



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 청 구 논 문

SWAT-EFDC를 연계한 입장저수지의 유사 해석

Analysis of sedimentation processes
in Ipjang reservoir using SWAT and EFDC

2018년 1월

서울대학교 대학원

생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공

신 섯 별

국 문 초 록

본 연구에서는 유역 수문 모형과 수리 모형을 연계하여 유역의 토양 유실량과 저수지 내 퇴적량을 예측하고, 유역의 종합적인 유사 관리를 위한 유사 저감 방안을 모색하였다. 이를 위해 수문 모형을 이용하여 상류 유역에서 발생하는 토양 유실량을 추정하고, 수리 모형을 이용하여 저수지 내 유사 퇴적 분포 및 퇴적량을 추정하였으며, 유사 저감 대책을 적용하여 상류에서의 유사 저감이 저수지 내 퇴적량 감소에 미치는 영향을 분석하였다.

입장 저수지 상류 유역인 양대천과 무명천에 대해 토양 유실량을 추정하기 위해 SWAT 모형을 사용하고, 저수지 내 유사 퇴적 분포 및 퇴적량을 추정하기 위해 EFDC 모형을 사용하였다. 유역의 유사 저감은 SWAT 모형에 발생원과 배출원 저감 대책을 적용하였다. 발생원 저감 대책은 밭과 나지에 대해 등고선 재배, 부초 멀칭 그리고 식생 피복을, 배출원 저감 대책은 유역 말단에 저류지를 적용하였다. 유사 저감 대책의 적용 결과 발생원 저감 대책이 적용된 밭과 나지는 유역 전체 면적에서 차지하는 비중이 약 3% 정도로 매우 작아 저감 효과가 미미한 반면, 저류지를 통한 배출원 저감 대책은 연평균 약 124.71 ton (24.7%)의 유사량을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. EFDC 모형을 이용하여 저수지 내 퇴적 분포 및 퇴적량을 분석한 결과 퇴적 분포는 초기에 유입부 부근에서 퇴적되고, 시간이 지날수록 제방 쪽으로 쌓여가는 양상을 보였다. 유사 저감 대책의 적용 결과 연평균 약 115.2 ton의 퇴적량을 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 유역의 유사 저감 대책 수립 시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : SWAT, EFDC, 토양 유실량, 저수지 퇴적, 유사 저감

학 번 : 2016-21705

목 차

국 문 초 록	i
목 차	iii
List of Tables	v
List of Figures	vii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 연구사	3
2.1. 토양 유실량 추정 및 유사 이송 모의	3
2.2. 수문 모형과 수리 모형을 이용한 유사 모의	4
2.2.1. 수문 모형을 이용한 유사 모의	4
2.2.2. 수리 모형을 이용한 유사 모의	4
2.2.3. 수문 모형과 수리 모형을 연계한 유사 모의	5
2.3. 유사 관리 기법에 따른 유역 유사 저감 연구	7
제 3 장 연구방법	11
3.1. 연구 대상지	12
3.1.1. 지형 현황	13
3.1.2. 기상 현황	16
3.1.3. 저수지 현황	19
3.2. 모형의 유사 해석	20
3.2.1. SWAT 모형의 유사 해석	20
3.2.2. EFDC 모형의 유사 해석	23
3.3. 유사 저감 대책	30

제 4 장 수문 모형과 수리 모형을 이용한 유사 해석	33
4.1. SWAT 모형	33
4.1.1. 입력 자료 구축	33
4.1.2. 모형의 보정	38
4.2. EFDC 모형	51
4.2.1. 입력 자료 구축	51
4.2.2. 모형의 보정	54
4.3. 유사 저감 대책의 적용	57
4.3.1. 발생원 관리	57
4.3.2. 배출원 관리	63
4.4. 유사 관리에 따른 저수지 퇴사 저감 분석	66
4.4.1. 저수지 내 퇴적 분포	66
4.4.2. 저수지 내 퇴적량	69
 제 5 장 요약 및 결론	 71
 참 고 문 헌	 73
 Abstract	 83

List of Tables

Table 3.1. Land use area and percentage of the Ipjang watershed (ha)	15
Table 3.2. Sediment management of generating source	30
Table 4.1. Weather data type and source for SWAT model	34
Table 4.2. Evaluation criteria for the recommended statistical performance measures for watershed-scale models (Moriassi et al., 2015) ..	37
Table 4.3. Stage-discharge relationships at the YANG and NNM watershed ..	38
Table 4.4. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the study watershed	41
Table 4.5. Load-discharge relationships at the YANG and NNM watershed	45
Table 4.6. List of calibration parameters for daily loads of suspended solids (SS) simulation for the study watershed	46
Table 4.7. Comparison of simulated annual loads of suspended solids (SS)	50
Table 4.8. List of calibration parameters for sediment transport simulation for the Ipjang reservoir	54
Table 4.9. Simulated annual loads of suspended solids (SS) for 2012~2017 using SWAT model	58
Table 4.10. Land use patterns of 18 sub-watersheds at the study watershed ..	59
Table 4.11. Estimating the capacity of detention pond according to Brune's curve	63
Table 4.12. Sediment reduction rates by different size of detention ponds	64
Table 4.13. Annual sediment deposition and trap efficiency comparing before and after sediment management	69

List of Figures

Fig. 2.1. Sediment management of discharge source	8
Fig. 3.1. Schematic diagram of this study	11
Fig. 3.2. Location and river stream map of the Ipjang watershed	12
Fig. 3.3. DEM of the Ipjang watershed	13
Fig. 3.4. Soil map of the Ipjang watershed	14
Fig. 3.5. Land use map of the Ipjang watershed	15
Fig. 3.6. Thiessen polygon and annual and monthly rainfall (1997–2017) ...	17
Fig. 3.7. Weather data of the Ipjang watershed (1997–2017)	18
Fig. 3.8. Area–capacity curves of the Ipjang reservoir	19
Fig. 3.9. Horizontal coordinate system and sigma coordinate transformation ...	24
Fig. 3.10. Estimation of retention pond’s capacity using Brune’s curve	31
Fig. 3.11. Sub–watershed map of the Ipjang watershed using SWAT	34
Fig. 4.1. Stage–discharge relationships	38
Fig. 4.2. Calculated discharge from stage–discharge relationship	40
Fig. 4.3. Observed and simulated daily stream flow at the YANG watershed for calibration	43
Fig. 4.4. Observed and simulated daily stream flow at the NNM watershed for calibration	44
Fig. 4.5. Load–discharge relationships developed for suspended solids (SS) at the YANG watershed	45
Fig. 4.6. Load–discharge relationships developed for suspended solids (SS) at the NNM watershed	46
Fig. 4.7. Calculated and simulated daily loads of suspended solids (SS) at the YANG watershed for calibration	48
Fig. 4.8. Calculated and simulated daily loads of suspended solids (SS) at	

the NNM watershed for calibration	49
Fig. 4.9. Model grid mesh and bathymetry of the Ipjang reservoir	51
Fig. 4.10. Boundary conditions for sediment transport analysis of the Ipjang reservoir	52
Fig. 4.11. Time series plots of suspended solids (SS) concentration in the vicinity of spillway and intake tower for irrigation	53
Fig. 4.12. Comparison of two grids: Storage–elevation curve and simulated water level	56
Fig. 4.13. Proportions of SS load discharge to reaches from each land use ...	58
Fig. 4.14. Spatial distributions of annual SS loads in each sub–basin (2012~2016)	60
Fig. 4.15. Spatial variations of annual SS loads for 2017 and land use percentages of sub–watersheds which have highest share of total soil loss from the Ipjang watershed	61
Fig. 4.16. Cumulative SS loads before and after applying sediment management for load generation	62
Fig. 4.17. Cumulative SS loads before and after applying sediment management for load discharge	65
Fig. 4.18. Distribution and height of sediment deposition in the Ipjang reservoir at 2017	66
Fig. 4.19. Sediment distribution in the Ipjang reservoir before applying sediment management	67
Fig. 4.20. Sediment distribution in the Ipjang reservoir after applying sediment management	68
Fig. 4.21. Cumulative sediment deposition loads under sediment management ..	70

제 1 장 서 론

농업용 저수지는 수자원의 안정적 확보와 공급을 목적으로 1900년대 이후 약 18,000 여 개가 건설되었다(한국농어촌공사, 2016). 농업용 저수지는 관개기 및 갈수기에는 용수 공급을 통한 이수의 기능을 수행하고, 홍수기에는 저류를 통한 치수의 기능을 수행하는 등 수자원의 시·공간적인 편중을 극복하기 위한 중요한 수단이다(남원호, 2013).

한편, 저수지 내로 유입된 유사의 퇴적은 저수지 기능에 여러 가지 장애를 초래한다. 저수지 내 퇴사로 인한 가장 큰 문제는 저류용량의 감소로 인해 가용 수자원이 줄어드는 것이다. 이외에도 저수지 내 유사의 퇴적은 상류 하천의 하상 상승, 하류 하상의 변화, 준설토 처리 등과 같은 문제들을 발생시킨다(윤용남, 1988; 안재현 등, 2006). 또한 과도한 유사의 유입은 고탁수 장기화의 문제를 일으키고, 유사와 함께 다량의 오염원이 유입되어 저수지 부영양화의 원인이 될 수 있다(Her, 2002; 강문성 등, 2003; 김정곤 등, 2008). 또한 토립자 등에 흡착된 형태의 중금속이 함께 유입될 수 있으며, 관개수를 통해 주변 토양 및 농작물에 중금속이 축적될 위험성이 존재한다(한국환경정책·평가연구원, 2009).

이와 같이, 저수지 내 유사 유입으로 인한 이수와 치수 그리고 환경적인 영향이 크기 때문에 유역에서 발생하는 토양 유실량 및 저수지 내 유사 퇴적의 예측 그리고 유역 차원의 유사 저감 대책을 수립하는 것은 저수지의 계획이나 운영에 있어서 중요한 사항이다. 이를 위해 유사량-유량 관계 곡선, 경험 공식 등으로 유역의 토양 유실량을 예측하기 위한 많은 시도들이 있었으며, GIS (Geographic Information System)와 수문 모형을 연계하여 유역의 토지이용, 최적관리기법 등을 함께 고려할 수 있는 수준으로 발전해 왔다.

이러한 수문 모형을 이용하여 토양 유실량을 추정하고 최적관리기법 등의 유사 저감 대책을 적용한 연구들은 국내·외에서 널리 진행되었다(Nasr

et al., 2004; Singh et al., 2005; Im et al., 2007; Gholami et al., 2012; Phomcha et al., 2012; 이지민 등, 2012; 정충길 등, 2012; 최용훈, 2013). 그러나 대부분은 유역에서 발생한 토양 유실량의 추정에 집중하며, 발생한 유사의 저수지 내 유입에 관한 연구 사례는 비교적 적은 상황이다.

저수지로 유입된 유사의 거동은 수치 해석 기반의 수리 모형을 이용하여 분석할 수 있으며, 이를 통해 유사의 퇴적 분포 및 퇴적량 등을 추정할 수 있다. 수리 모형을 이용하여 저수지 내 부유사 확산, 퇴적물 이동 및 퇴적고 등을 추정한 연구가 다수 있으며(Leon et al, 2006; 류재일, 2010; 방기영, 2013; Liu et al., 2016; Kashyap et al., 2017), 노준우 등(2014)은 수리 모형을 이용하여 저수지의 장기퇴적 양상을 모의하고, 배사문 조작에 의한 배사효과를 모의하여 저수지의 운영 방안을 제시한 바 있다.

한편 수문 모형과 수리 모형을 연계하여 수질 분석을 수행한 연구는 몇몇 진행된 바 있다(Wool et al., 2003; 박재충 등, 2010; 노희진 등 2011; 최익성, 2012; Zhao et al., 2013). 이들 연구는 유사뿐만 아니라 BOD, T-N, T-P 등의 다양한 수질 분석을 수행해 왔으며, 수질 항목 당 어느 정도의 삭감률을 가정하여 적용하는 등의 수질 관리 시나리오를 적용하였다. 이와 같이 수문 및 수리 모형 간의 연계로 유역과 저수지를 연결한 종합적인 유사 해석이 가능하나, 상류 유역의 유사 저감 대책과 저수지 내 퇴적 저감을 함께 고려한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수문 모형과 수리 모형을 연계한 종합적인 유역 유사 해석을 위해, (1) 수문 모형을 이용하여 유역에서 발생하는 토양 유실량을 추정하고, (2) 수리 모형을 이용하여 저수지 내 유사 퇴적 분포 및 퇴적량을 추정하며, (3) 유사 저감 대책을 적용하여 유역의 유사 저감 대책이 저수지 내 퇴적량 감소에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

제 2 장 연구사

2.1. 토양 유실량 추정 및 유사 이송 모의

유사와 관련된 연구는 크게 유역에서 발생하는 유실량의 추정과 유사 이송으로 나뉜다. 먼저, 토양 유실량 추정의 경우 국내에서 주로 사용되고 있는 방법은 유사량-유량 곡선 이용법, 유역 내 저수지 퇴사 자료 이용법, 경험공식, GIS와 결합된 USLE (Universal Soil Loss Equation) 혹은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 등의 토양 유실량 추정 공식을 적용하는 방법, 그리고 유역 유출 모형을 이용하는 방법 등으로 구분할 수 있다(건설교통부, 1992). 이 중에서 유역 단위 수문 모형을 제외한 나머지 방법은 소규모 단일 영역에는 적용할 수 있으나, 대규모 복합 유역에는 적용하기에는 적합하지 않다(김대곤, 2010). 수문 모형이 본격적으로 개발되기 전에는 이러한 한계를 극복하기 위해, USLE 공식의 각 인자에 대한 추정, GIS와의 연계 등을 시도하는 연구들이 다수 진행된 바 있다(최진규 등, 1998; 강문성 등, 2003; Her et al., 2006).

한편, 유사 이송의 경우 다양한 공식이 개발되어 왔으며, 이를 비교, 분석 및 평가하는 연구가 많이 수행되고 있다. 대표적인 유사 이송 공식으로는 Englund and Hansen(1967), Ackers and White(1973), Yang(1979), Brownline(1981), van Rijn(1984) 등이 개발한 공식이 있으며 이를 해석하기 위해 다양한 수리 모형을 사용하고 있다. 우리나라에서는 현장 모니터링을 통한 유사 계측 자료가 부족한 실정이므로, 모형을 이용하여 유역의 토양 유실량을 추정하고, 유사 이송 등을 모의하는 연구들이 활발히 수행되어 왔다.

2.2. 수문 모형과 수리 모형을 이용한 유사 모의

2.2.1. 수문 모형을 이용한 유사 모의

토양 유실량 추정을 위한 대표적인 모형으로는 CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion for Agricultural Management System)(Knisel, 1980), WEPP (Water Erosion Prediction Project)(Flanagan and Nearing, 1995), GUEST (Griffith University Erosion Sedimentation Template) (Fentie et al., 1999), EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model) (Morgan et al., 1998), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998), HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Donigian et al., 1983) 등이 있다.

이 중 SWAT 모형과 HSPF 모형은 유역 내 유출, 유사 및 영양물질 등의 모의가 가능하여 수문·수질 해석에 국내·외에서 널리 사용되고 있는 모형이다. 모의대상 및 적용범위에 따라 SWAT 모형은 농경지 및 유사량 추정에 적용하는 것이, HSPF 모형은 도시지역 및 유출량 추정에 적용하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다(Nasr et al., 2004; Singh et al., 2005; Im et al., 2007; 최용훈, 2013). 국내에서는 SWAT 모형을 이용하여 탁수 문제가 심각한 유역의 부유사량을 추정한 연구가 다수 수행된 바 있으며(강동균, 2005; 김정곤 등, 2008; 예령 등, 2008; 이근상 등, 2009), 토양 유실 문제가 심각한 고랭지 농경지 및 산림 유역을 대상으로 한 연구도 활발히 수행되었다(임상준 등, 2003; 허성구 등, 2008; 장선숙과 김성준, 2017).

2.2.2. 수리 모형을 이용한 유사 모의

하도 내 유사의 이송은 수치 해석 모형을 통해 모의하며, 대표적인 모형에는 1차원 모형인 HEC-6 (Hydrologic Engineering Center)(Thomas and Prashum, 1977), GSTARS (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation)(Molinas and Yang, 1986), 2차원 모형인 SED2D (Waterways Experiment Station, 1998), Delft 2D(Walstra et al., 1998),

3차원 모형인 ELCOMSED (Estuarine, Coastal, and Ocean Model—SEDiment transport)(Blumberg and Mellor, 1987), EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)(Hamrick, 1992) 등이 있다. 3차원 수리 모형은 1차원과 2차원 모형에 비해 모의 시간, 컴퓨터 성능 등의 물리적인 한계로 인해 시·공간적인 모의 범위가 제한적이지만, 입력 자료 구축 및 보·검정에 대한 부담이 적고, 모의 결과의 신뢰성이 큰 장점이 있다(Papanicolaou et al., 2008). 또한 3차원 모형인 ELCOM과 EFDC는 수리 모의를 통해 수질 모형과의 연계가 가능한 장점이 있다.

ELCOM 모형을 적용한 연구는 대형 저수지의 탁수 모의에 적용된 바 있다(Leon et al., 2006; 정세웅 등, 2008; 이정현 2011), EFDC 모형을 적용한 연구는 국내·외에서 다양하게 수행된 바 있으며, 저수지, 간척지, 하구 등에서 퇴적물의 이동 및 퇴적고 산정 등의 하상 변동 모의(류재일, 2010; 이동주와 박영기, 2013; 방기영 2013; 박원철, 2016; Kashyap et al., 2017), 부유사 확산 모의(Liu and Huang, 2009; 김진혁 등, 2011; Liu et al., 2016; Xu and You, 2017) 등에 적용된 바 있다. 특히 노준우 등(2014)은 EFDC를 이용하여 유량, 유사 및 수문 운영에 따른 저수지의 장기퇴적 양상을 모의하고, 배사문 조작에 의한 배사효과를 모의하여 저수지의 효과적인 운영 방안을 제시한 바 있다.

2.2.3. 수문 모형과 수리 모형을 연계한 유사 모의

한편, 앞서 살펴본 수문 모형과 수리 모형을 종합적으로 고려하여 유역의 유출, 유사 및 수질 모의를 고려한 연구도 몇몇 진행되어 왔다. 전용봉 (2014)은 부유토사의 유출 억제를 위해 유역의 유출량은 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)(김현영과 박승우, 1988)을 통해 추정하고, 유역에서 발생하는 토양 유실량을 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)공식을 통해 추정한 후, 부유사의 침강특성을 실내 시험 등을 통해 수행한 후 침사지 설계 방안을 제시한 바 있다. 하지만

RUSLE 식은 연평균 토양유실량 산정에 적합하므로, 개별 강우 사상에 적용하기 어려우며, 현장 실험 등의 실측치가 존재하지 않는 경우 적용하기 힘들 것으로 사료된다.

김동일 (2012)은 유역의 탁수 유입이 저수지 및 하류 하천에 미치는 영향을 분석하기 위해 HSPF 모형을 통해 유역에서 발생하는 유출, 유사를 추정하고, 2차원 수리 모형 CE-QUAL-W2을 이용하여 저수지 내 수질 모의를 수행한 바 있다. 또한 김대곤 (2010)은 유역 내 토사 수지 분석을 위해 SWAT 모형과 1차원 수리 모형 HEC-RAS를 이용한 바 있다. 그러나 저수지 내부 유동을 1차원 혹은 2차원 모형으로 모의할 경우 저수지 내에서의 유사 퇴적 분포 등을 파악하기 어려운 점 등의 한계가 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 수문 모형과 3차원 모형을 이용하여 저수지 내의 수질을 예측한 연구가 진행되어 왔다(박재충 등, 2010; 노희진 등 2011; 최익성, 2012). 이들 연구들은 EFDC 모형을 통해 저수지의 유동 해석을 수행한 후, 수질 예측을 위해 WASP (Water quality Analysis Simulation Program)(Di Toro et al., 1983) 모형과의 연계를 통해 유사뿐만 아니라 BOD, T-N, T-P 등의 다양한 수질 분석을 수행하였다. 그러나 대부분은 모형의 구축을 통한 수문·수리·수질 분석에 초점을 맞추고 있으며, 한 걸음 더 나아가 수질 저감 대책 등을 제시한 연구는 부족한 실정이다. 국외의 경우 오염총량제의 적용과 함께 HSPF 및 EFDC 모형을 이용하여 수질 분석 및 저감 시나리오의 적용을 한 사례가 다수 있으나(Wool et al., 2003; Zhao et al., 2013), 수질 항목 당 어느 정도의 삭감률을 가정하여 적용하는 등 실질적으로 유역의 수질 개선을 위해 적용할 수 있는 대책을 제안한 연구 사례는 부족한 상황이다.

2.3. 유사 관리 기법에 따른 유역 유사 저감 연구

유사 저감을 위한 관리 방법은 비점오염원 관리를 위한 최적관리기법(Best Management Practice; BMP)의 틀에 속하며, 크게 구조적 대책과 비구조적 대책으로 나눌 수 있다. 구조적 대책은 침전지 및 침투지대 건설 및 각종 물리적 처리시설 설치 등의 공학적 기법과 식생수로, 수변 완충지대 등의 생태기술에 바탕을 둔 방법이며, 시설 설치 비용 등이 높지만 수질 개선 효과가 좋은 것으로 알려져 있다. 비구조적 대책은 토지이용규제, 도시관리, 친환경 경작 방법 보급, 운작 등 발생원을 근본적으로 억제하는 방법이며, 비용은 적게 들지만 민원 발생 등의 소지가 높은 것으로 알려져 있다(손중석, 2010).

발생원은 수질오염의 원인이 되는 오염물질을 최초로 생성하는 원인자 또는 원인 행위를 의미하며, 점오염원과 달리 비점오염의 발생원은 강우시 불특정한 경로로 유출되며, 배출지점이 불명확하여 차집이 곤란하며, 처리 효율이 일정하지 않은 특징이 있다. 따라서 비점오염원은 주로 토지의 이용형태와 경작활동 및 경제활동과 크게 연관이 있으며, 특히 강우를 통해 유출된다는 특성을 지니므로 지형특성 및 강우특성과도 관련이 깊다(전북발전연구원, 2007).

발생원으로부터 생성된 오염물질이 하천으로 유입되어 유역에 배출되면 배출원이라고 한다. 유사 저감을 위한 BMP는 상류 유역 및 수변을 따라 기 조성된 자연자원을 이용하거나 새로운 자연환경을 조성하여 적용하는 방안이 있다. 유사 저감 BMP의 종류로는 모래 및 자갈 여과필터, 식생수로·초생수로, 수변 완충 지대, 인공습지, 침투지, 저류지, 침사지·침전지·침강지 등이 있다(국립환경과학원, 2010; 환경부, 2014).

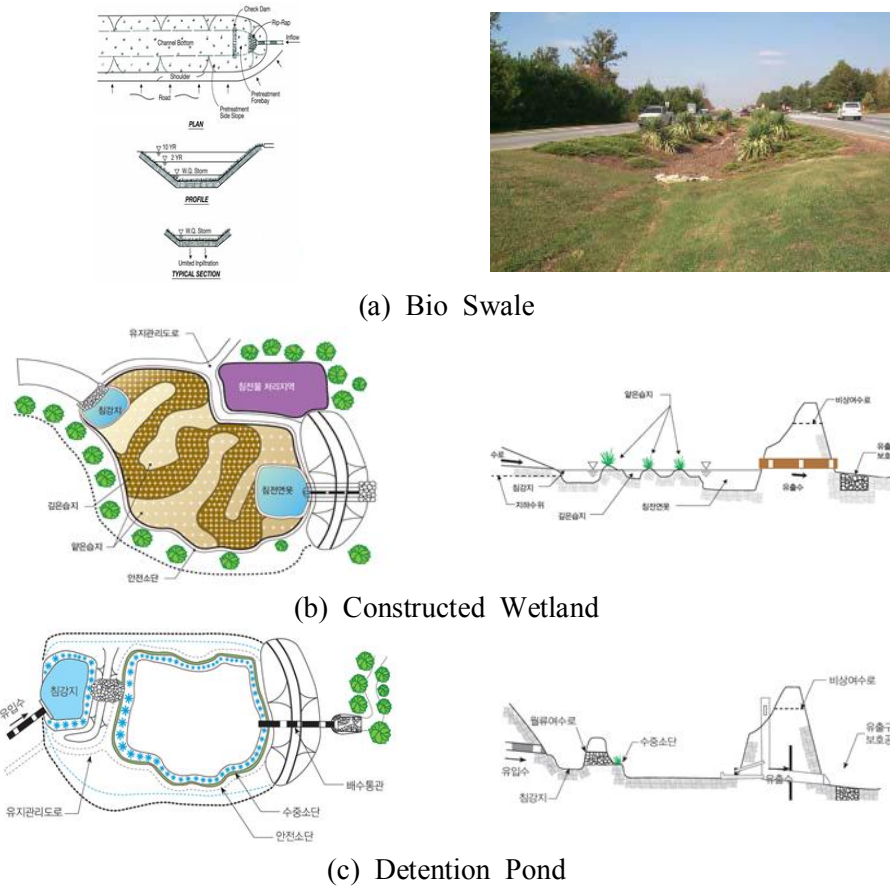


Fig. 2.1. Sediment management of discharge source

식생수로(Bio swale)는 수로에 잡초, 초본, 수목 등을 식재하여 식생에 의한 여과 및 흡착으로 토양으로의 침투를 증대시키고, 강우 시 토양침식을 감소시키며, 강우 유출수 내의 유사를 저감하는 등의 효과가 있다. 또한 자연적인 조성으로 동식물의 서식처를 제공하며, 녹지 경관의 기능을 한다.

인공습지(Constructed wetland)는 인공적인 습지를 개발하여, 침전, 여과, 흡착을 통한 강우 유출수 내 유사 저감의 효과가 있으며, 조경적인 가치 및 야생 서식지의 기능을 한다. 인공습지의 경우 자연습지가 보유하고 있는 정화능력을 향상시킬 수 있으나, 자연습지와는 달리 지속적인 흐름

또는 수생식물의 성장을 뒷받침할 수 있는 일정 이상의 수위 확보가 필요하다.

저류지 혹은 침사지(Detention pond)는 강우 유출수를 저류·체류시키며, 저류지 내의 중력 침전을 통해 강우 유출수 내 유사저감 및 침투유량 조절 기능을 한다. 저류지는 저비용-고효율의 강우 유출수 관리가 가능한 시설로, 본래의 기능인 침투유량 조절 기능 이외에도 상시 저류 기능을 통해 강우 유출수 내 유사 등의 오염물질 처리가 가능하다. 저류지는 홍수 발생 위험이 없고, 하류부 수온이 낮지 않은 곳에 위치하여야 하며, 처리 대상물질이 유사 혹은 흙탕물인 경우, 토사의 침강속도에 따른 포착효율을 고려하여 저류시설의 용량이 결정된다.

이러한 다양한 최적관리기법들의 저감 효과를 분석하기 위해 수문 모형을 이용하여 최적관리기법을 적용한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 발생원을 저감하기 위해 밭 지역에 벧짚피복, 부초 멀칭 및 등고선 재배 등의 작물 피복 관리 및 토양 보전·경운 관리를 HSPF 및 SWAT 모형에 적용한 연구가 다수 수행된 바 있으며(Gholami et al., 2012; Phomcha et al., 2012; 이지민 등, 2012; 정충길 등, 2012), 이 외에 SWAT 모형에 적용된 다양한 발생원 저감 BMP 기법들은 Volk (2016, 2017)에서 자세히 소개한 바 있다.

한편, 구조적 대책의 식생 여과대, 수변 완충 지대 등을 SWAT 모형을 통해 구현하고(우효섭과 오종민, 2005; Bracmort et al., 2006; 박종윤 등, 2010), SWAT 모형을 이용하여 인공습지 및 저류지 등을 적용한 연구가 다수 수행된 바 있다(Arnold et al., 2001; 신현석과 강두기, 2006; Waidler et al., 2009; 김민호 등, 2012). 또한 유역의 유사 저감을 위해 저류지 혹은 침사지 등의 설치 시 적정 규모를 결정하기 위한 방법을 제안한 연구도 다수 진행된 바 있다(우창호와 황국웅, 1999; 최중대, 2001; 장인수 등, 2010).

제 3 장 연구방법

본 연구에서는 수문 모형과 수리 모형을 이용한 유사 저감 방안을 분석하기 위해 유역의 유사량 해석에 적합한 수문 모형으로 SWAT 모형을 선정하고, 저수지 내 유사 해석에 적합한 수리 모형으로 EFDC 모형을 선정하였다. 본 장에서는 연구 대상지, 모형의 유사 해석 이론, 모형 구축 방법, 유사 저감 방안을 소개하고, 연구방법을 제시하고자 한다. 본 연구의 흐름도를 개괄하여 나타내면 Fig. 3.1.과 같다.

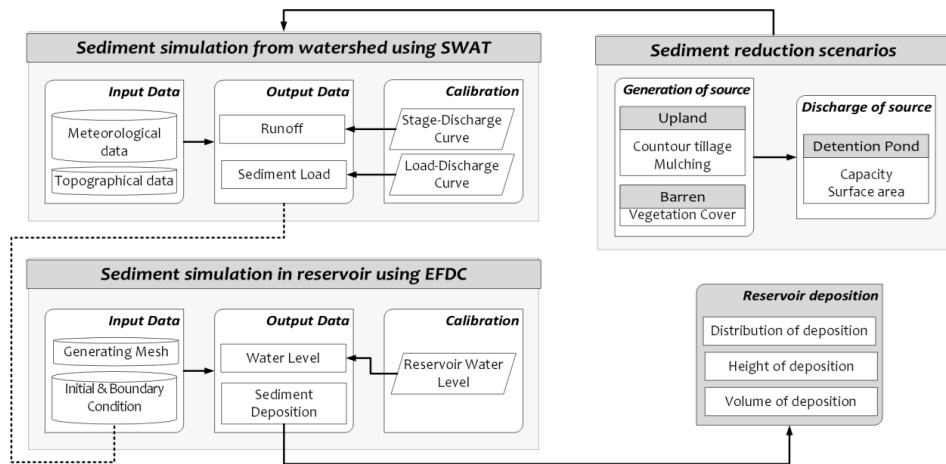


Fig. 3.1. Schematic diagram of this study

3.1. 연구 대상지

본 연구 대상지인 입장 저수지는 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대리 및 기로리 일대에 위치하고 있다. 입장 저수지의 상류에는 양대천과 무명천의 2개의 하천이 저수지로 흐르고 있으며, 하류는 입장천으로 합류하여 안성천으로 흘러들어간다. 입장저수지 상류 유역의 면적은 약 7.4 km^2 이며, 유역의 표고는 약 64 El., m에서 520 El., m 내외로 유역의 상류에 위례산 (523 El., m), 부소산(459 El., m) 등이 위치하고 있다. Fig. 3.2. 는 연구 대상지의 위치 및 하천도를 나타내고 있다.

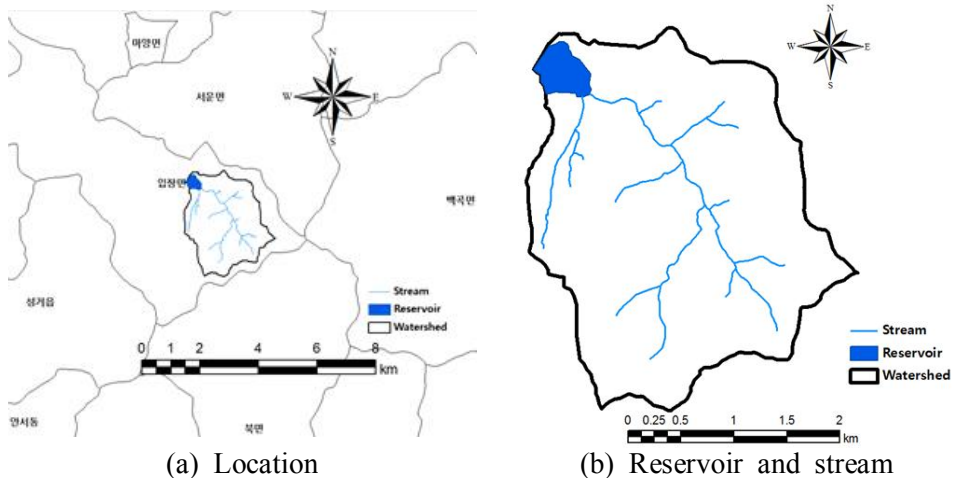


Fig. 3.2. Location and river stream map of the Ipjang watershed

3.1.1. 지형 현황

대상유역의 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM)자료를 구축하기 위하여 1:5,000 NGIS (National Geographical Information System) 수치지도를 이용하였다. 수치지도로부터 등고선을 분리하여 등고선도를 구축하고, 이로부터 해상도가 5m인 DEM 자료를 구축하였다(Fig. 3.3.).

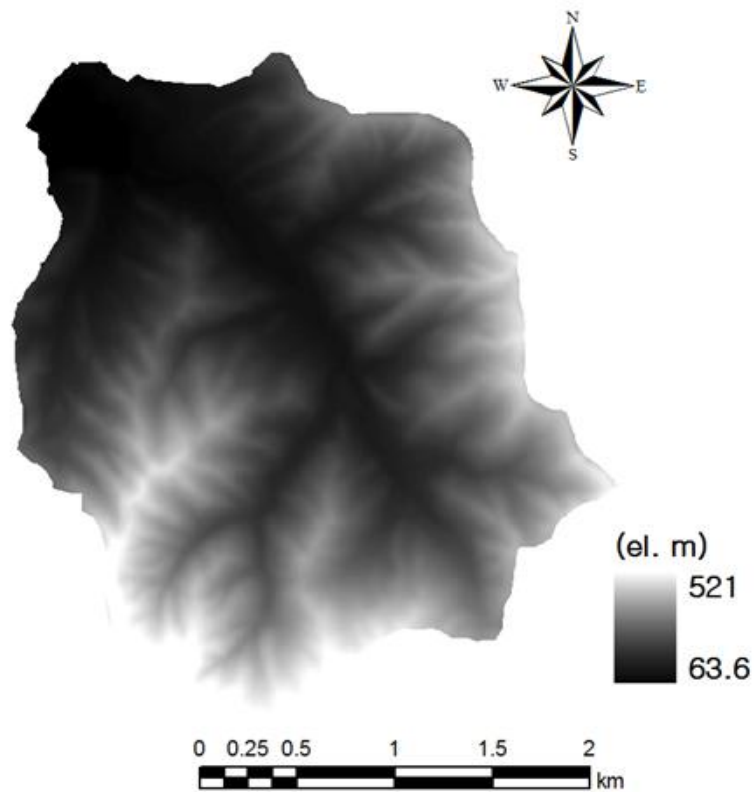


Fig. 3.3. DEM of the Ipjang watershed

대상유역의 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 이용하였다(Fig. 3.4.). 벡터로 작성된 폴리곤 (polygon)에 각각의 토양을 구분하여 토양통명, 토성, 토층 수 및 그에 해당하는 토심, 비중, 유기물 함유율, 그리고 점토, 실트, 모래 및 자갈 함유율 등을 속성으로 입력하였다.

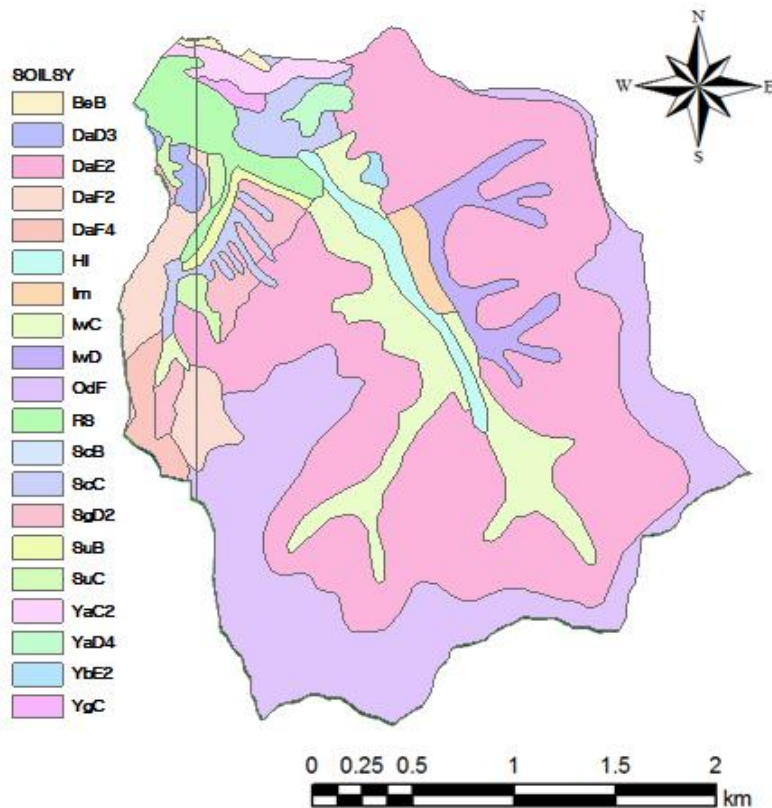


Fig. 3.4. Soil map of the Ipjang watershed

토지이용도는 환경부에서 제공하는 2013년 기준으로 작성된 1:25,000 해상도의 중분류 토지피복도를 이용하였다(Fig. 3.5.). Table 3.1.은 유역의 토지 이용 면적 및 비율을 나타내며, 산림 지역이 82.1%로 대부분을 차지하고 있으며, 농업 지역 (6.2%), 초지 (5.7%), 수역 (2.3%), 시가화/건조 지역 (2.4%), 습지 (0.9%) 및 나지 (0.5%)가 분포되어 있다.

Table 3.1. Land use area and percentage of the Ipjang watershed (ha)

Sum	Urban area ^a	Agricultural area ^b	Forest ^c	Pasture ^d	Wetland	Barren area ^e	Water
739.22 (100%)	17.48 (2.4%)	45.47 (6.2%)	607.05 (82.1%)	42.24 (5.7%)	6.38 (0.9%)	3.88 (0.5%)	16.73 (2.3%)

a Urban area includes residential, industrial, commercial, leisure, transportation and public building

b Agricultural area includes paddy, upland, greenhouse, orchard and other crop

c Forest includes deciduous forest, coniferous forest and mixed forest

d Pasture includes pasture and golf course

e Barren area includes mining area and other barren

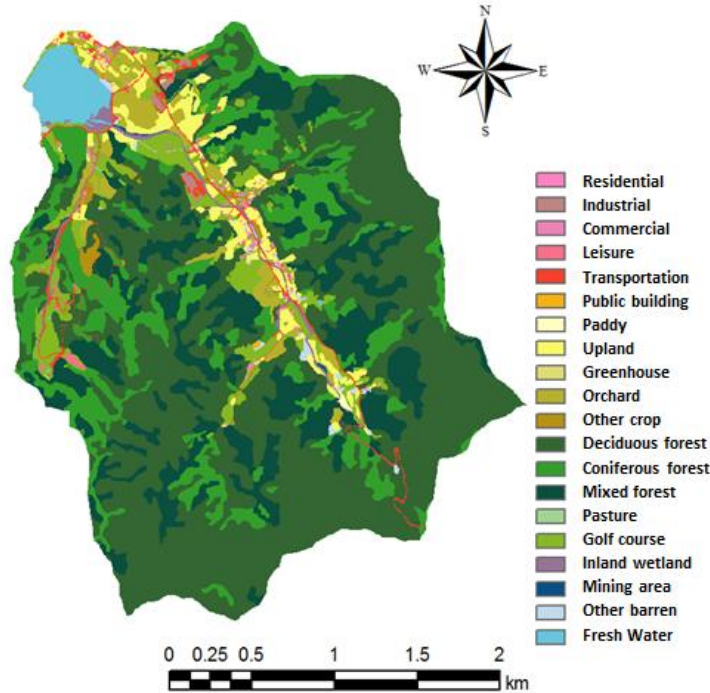
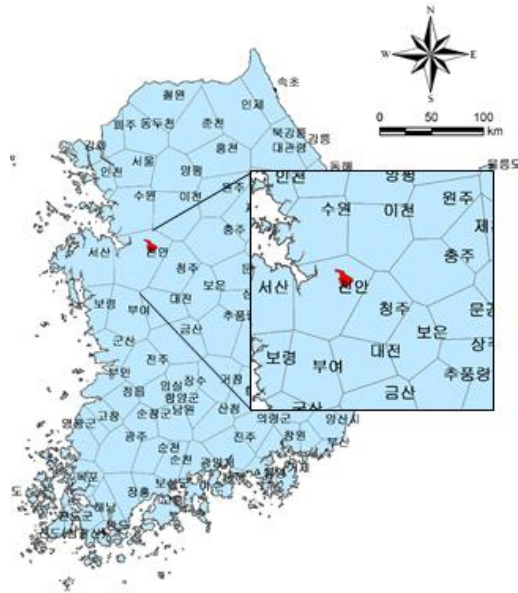


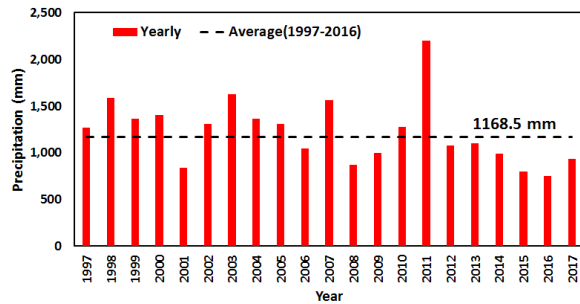
Fig. 3.5. Land use map of the Ipjang watershed

3.1.2. 기상 현황

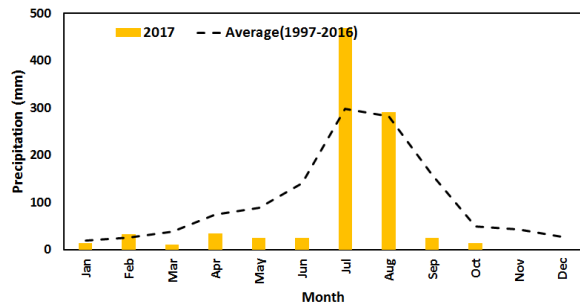
입장저수지 유역의 지배 강우관측소는 서운 관측소, 기상관측소는 천안 관측소이다. 서운 관측소의 최근 20년(1997년-2017년) 강우 자료와 천안 관측소의 최근 20년(1997년-2017년) 기상자료(기온, 습도, 풍속, 일사량 등)를 수집하였다. 서운 관측소의 최근 20년 연평균 강수량은 1,168.5 mm로 전국 연평균 강수량 1,315 mm 보다 적은 양을 기록하였다(Fig. 3.6.). 2015년과 2016년의 연강수량은 각각 752 mm, 797 mm로, 지난 20년 대비 약 64~68% 수준으로 나타났다. 2017년의 경우 6월까지의 강수량은 평년에 비해 매우 적은 것으로 나타났으나, 7월과 8월에 지난 20년 대비 많은 강수량을 기록했다(7월, 8월 각각 468 mm, 291 mm).



(a) Thiessen polygon



(b) Annual rainfall (1997-2017*)

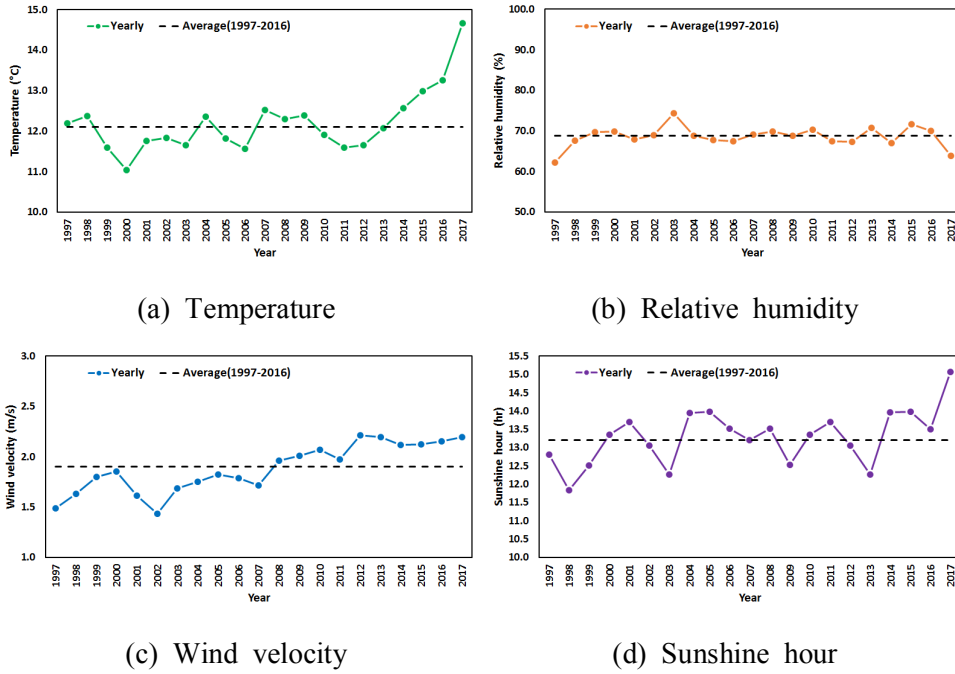


(c) Monthly rainfall (1997-2017*)

* Rainfall data of 2017 was collected to 31th October

Fig. 3.6. Thiessen polygon and annual and monthly rainfall (1997-2017)

천안 기상관측소의 기온, 습도, 풍속, 일조시간 등의 자료를 분석하였고, Fig. 3.7.에 도시하였다. 수집한 기상자료는 모델링을 위한 기초자료로 활용되었다.



* Weather data of 2017 was collected to 31th October

Fig. 3.7. Weather data of the Ipjang watershed (1997-2017)

3.1.3. 저수지 현황

입장저수지는 1943년 착공 후, 1952년 준공되었으며, 유역면적 752 ha, 수혜면적 352 ha이며, 총 저수량 636,330 m^3 의 1종 저수지이다. 입장저수지의 홍수위는 67.1 El., m, 만수위는 65.6 El., m, 평수위는 65.1 El., m, 사수위는 59.6 El., m이며, 하절기 제한수위는 최저 63.5~최고 64.1 El., m를 유지하고 있다. 2017년 6월 저수지의 수심 측량을 실시하였으며, 측량 자료를 통해 산정한 내용적 곡선은 Fig. 3.8.과 같이 나타난다.

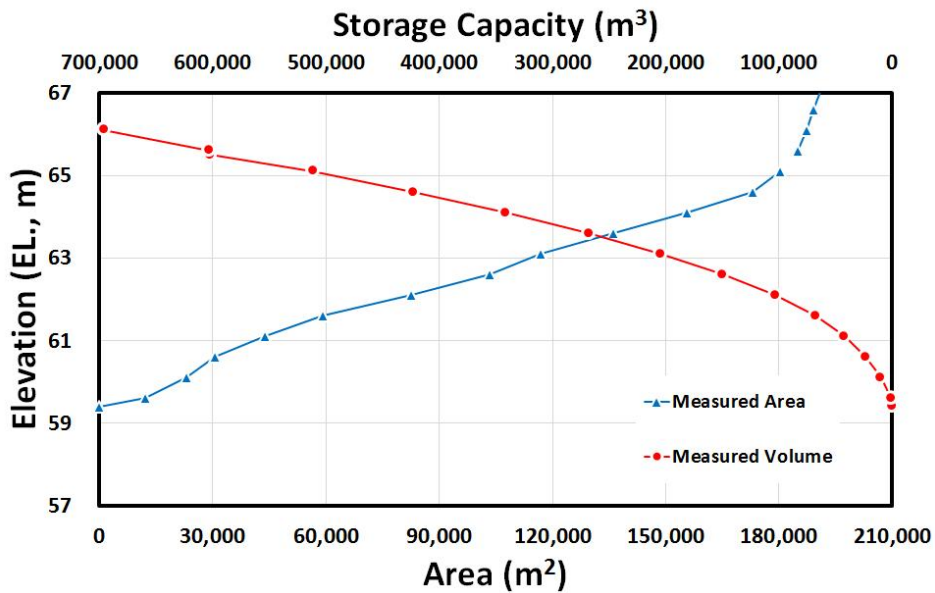


Fig. 3.8. Area-capacity curves of the Ipjang reservoir

3.2. 모형의 유사 해석

3.2.1. SWAT 모형의 유사 해석

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에 의해 개발된 모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태 따른 수문과 유사 및 농업화학물질의 거동을 모의할 수 있도록 개발되었다(Arnold et al., 1998). SWAT은 CREAMS, GLEAMS, EPIC 모형을 기초로 하여 개발되었으며, 현재의 SWAT 모형은 SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)를 발전시킨 형태이다.

SWAT 모형은 유역의 지형특성을 고려하여 대상유역을 몇 개의 소유역(subbasin)으로 나누고, 소유역을 토지이용 및 토양 특성에 따라 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화한다. 전체적인 모의는 유역부분과 수체부분으로 나누어 실시되는데 유역에서는 각 HRU에서 물 수지식에 따라 강우량, 지하수로의 침투량, 증발산량 그리고 지표유출량을 산정한다.

SWAT 모형에서 일별 지표면 유출량은 SCS (Soil Conservation Service)방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model (Sloan and Moore, 1984)을 이용하고 침투는 토층을 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다. 토양침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의하여 계산되며, 인, 질소, 살충제 같은 유기성 화학물질의 이동을 모의할 수 있다.

SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구

분되며, 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 HRU 별 출력 자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과로 구분된다.

SWAT 모형의 유사량 산정은 MUSLE를 적용하고 있으며, MUSLE는 단일 강우 사상에 대한 토양 유실량 산정을 위해 USLE 식의 강우 에너지를 유효우량과 침투 유량의 함수인 유출로 대체하여 식(3.1)과 같이 정의한 것이다(Wischmeier and Smith, 1978; Williams, 1995)

$$sed = 11.8(Q_{surf}q_p area_{HRU})^{0.56}K_{USLE}LS_{USLE}C_{USLE}P_{USLE}CFRG \quad (3.1)$$

여기서, sed 는 유사량을 나타내고, Q_{surf} 와 $q_p(m^3/s)$ 는 각각 유출량과 침투 유량으로 USLE에서 강우에너지를 대체한 항목이다. $area_{HRU}(ha)$ 는 해당 HRU의 면적이며, K_{USLE} 는 각 토양의 침식 특성을 나타내는 토양침식계수, LS_{USLE} 는 경사길이와 경사도를 의미하는 지형특성인자, C_{USLE} 는 경사지의 피복상태, 식생의 종류, 식생 상태 등을 나타내며, P_{USLE} 는 등고선 재배, 테라스 재배 등의 토양보전인자를 나타내며, $CFRG$ 는 coarse fragment 인자이다.

한편, SWAT 모형은 하천에서의 유사 이송을 모의하기 위하여 퇴적(deposition)과 침식(degradation)의 두 작용을 동시에 고려하고 있으며, 이를 위해 물의 밀도, 유출률과 표면경사로 정의한 유수력(stream power)을 적용하고 있으며, 식(3.2)와 같다.

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{sp}v_{ch, pk}^{spexp} \quad (3.2)$$

여기서, $conc_{sed, ch, mx}(ton/m^3)$ 는 물에 의해 이송되는 최대 유사농도, $v_{ch, pk}(m/s)$ 는 침투유속, c_{sp} 와 $spexp$ 는 최대 유사농도를 결정하는 계수와

지수이다. 특히, 지수 $spexp$ 는 1~1.5 범위에서 다양한 값을 가지며, Bagnold의 유수력의 경우는 1.5로 하고 있다.

SWAT 모형에서 퇴적과 침식은 물에 의해 이송되는 최대 유사농도 $conc_{sed, ch, mx}$ 와 각 시간에 따른 하천 내 초기 유사농도인 $conc_{sed, ch, i}$ 를 비교하여 결정된다. 만약, $conc_{sed, ch, i} > conc_{sed, ch, mx}$ 이면 하천 내에서 퇴적이 우세하게 발생하는 것을 의미하며, $conc_{sed, ch, i} < conc_{sed, ch, mx}$ 이면 하천 내에서 침식이 우세하게 발생하는 것을 의미한다.

$$sed_{dep} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) V_{ch} \quad (3.3)$$

$$\text{if } conc_{sed, ch, i} > conc_{sed, ch, mx}$$

$$sed_{deg} = (conc_{sed, ch, i} - conc_{sed, ch, mx}) V_{ch} K_{CH} C_{CH} \quad (3.4)$$

$$\text{if } conc_{sed, ch, i} < conc_{sed, ch, mx}$$

여기서, V_{ch} 는 부피로 나타낸 하천 내 물의 양, K_{CH} 는 하천 침식피복계수, C_{CH} 는 하천피복계수를 나타낸다. SWAT 모형에서의 하천 내 최종 부 유사량은 식(3.5)에 근거하여 계산된다.

$$sed_{ch} = sed_{ch, i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (3.5)$$

여기서, 하천 내 부유사량 sed_{ch} 은 모의되는 기간의 초기 유사량인 $sed_{ch, i}$ 에서 침전되는 유사량 sed_{dep} 을 제외하고 침식에 의해 발생하는 유사량 sed_{deg} 을 고려하여 계산된다.

3.2.2. EFDC 모형의 유사 해석

EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) 모형은 1992년 버지니아 해양과학연구소의 Hamrick에 의해 개발된 동수역학, 질량수송, 수질이 통합된 3차원 통합모형이다. EFDC 모형은 강, 호수, 습지, 하구, 저수지, 연안 해역 등을 포함한 수표면계에서 3차원 흐름과 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성오염물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다. 또한 EFDC는 유동 모의 부분에 있어, 수심이 얇은 수체에 대한 wet/dry 모듈을 통해 인공습지 등에서의 유동을 구현할 수 있다.

EFDC 모형은 크게 수리, 수질, 토사, 독성물질 등의 이송을 모의하는 4개의 모듈이 통합된 모형으로, 4개의 모듈 중 수리 이송 모듈 (Hydrodynamics)은 6개의 항목으로 구성되어 있으며, 이 중 토사 이송 모듈 (Sediment transport)은 다시 부유사 (Water Column)와 소류사 (Sediment Bed)로 구성되고, 부유사 (Water Column)와 소류사 (Sediment Bed)는 다시 각각 점착성 (Cohesive)과 비점착성 (Noncohesive)으로 분류된다(Tetra tech, 1992).

가. 모형의 좌표계 및 기본 방정식

EFDC 모형에서는 수평 방향으로 직선 또는 곡선 좌표계를 사용하며, 수직 방향으로 σ -좌표계를 사용한다. σ -좌표계는 다양한 층 두께의 설정이 가능하며, 지형을 부드럽게 표현할 수 있어 급변하는 영역에 대하여 수치 오차를 줄여주고, 수심과 관계없이 같은 수의 연직층을 가진다 (Zhen, 2007). 수직 방향은 중력 벡터를 이용하여 바닥지형과 움직임이 있는 수면을 표현한다. 즉, 시간에 따라 위치와 길이가 변화하므로 수직방향에 대한 변환이 필요하며, σ -좌표계의 변환식은 식(3.6)과 같다.

$$z = \frac{z^* + h}{\eta + h} \quad (3.6)$$

이때, z 는 σ -좌표계, z^* 는 Cartesian 좌표계, $h(m)$ 는 바닥면과 수표면에서의 수심, $\eta(m)$ 는 수면의 변위를 나타낸다. 바닥은 z 가 0인 면으로, 수면은 z 가 1인 면으로 변환되어지며, z 가 1인 지점에서 자유수면 경계조건을 가지게 된다. Fig. 3.9는 EFDC의 σ -좌표계로의 변환을 나타낸다.

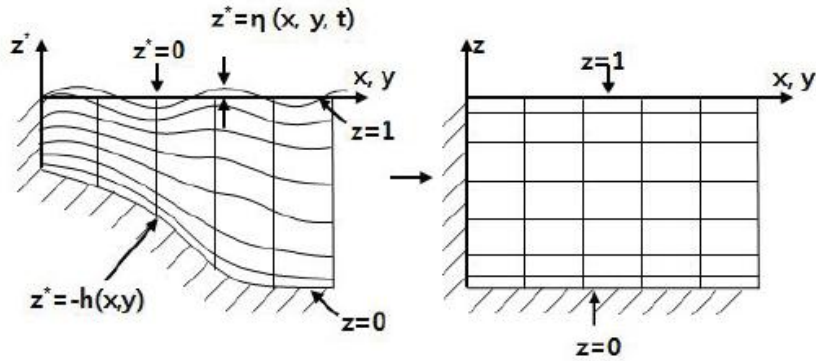


Fig. 3.9. Horizontal coordinate system and sigma coordinate transformation (Zhen, 2007)

EFDC 모형의 기본 방정식은 연속방정식(Continuity equation)과 운동방정식(Momentum equation), 물질보존방정식(Mass balance equation) 등으로 구성되어 있으며, 수치해석은 유한차분법(Finite Difference Method; FDM)과 유한체적법(Finite Volume Method; FVM)을 사용한다(Hamrick, 1992).

– 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

– 운동방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} - fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (3.10)$$

– 상태방정식

$$\rho = \rho(S, T) \quad (3.11)$$

– 물질보존방정식

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_S \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial(w_s C)}{\partial z} + Q_C + R_C \quad (3.14)$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z , 방향의 유속성분(m/s), t 는 시간(s), η 는 자유수면 높이(m), H 는 총 수심(m)(= $\eta + h$), h 는 기준면 아래의 수심(m), p 는 압력(N/m^2), g 는 중력가속도(m/s^2), f 는 Coriolis parameter (s^{-1}), A_V 는 수직 난류점성계수(m^2/s), K_V 는 수직 난류확산계수(m^2/s), Q_u, Q_v 는 수평 난류 점성 및 운동량의 생성-소멸항, ρ 는 유체의 밀도(g/m^3), T 는 수온($^{\circ}C$), S 는 염분(psu), w_s 는 부유물질의 침강속도(m/s), C 는 용존 또는 부유물질의 농도(g/m^3), Q_T, Q_S 는 수온과 염분의 수평 난류확산 및 생성-소멸항, Q_C, R_C 는 용존 또는 부유물질의 수평 난류확산 및 생화학적 반응 또는 외부 생성-소멸항을 나타낸다.

운동량 및 물질의 생성-소멸항인 수평 난류 점성항(Q_u , Q_v)과 수평 난류 확산항(Q_S , Q_T , Q_C)은 모델 격자보다 작은 규모의 유동현상을 묘사하며, 각각 식(3.15)~식(3.17)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$Q_v = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3.16)$$

$$Q_{T,S,C} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_H \frac{\partial(T,S,C)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_H \frac{\partial(T,S,C)}{\partial y} \right] \quad (3.17)$$

여기서, A_M , A_H 는 각각 수평 난류 점성계수 및 수평 난류 확산계수이며, 이들은 격자크기와 유속 경사에 의해 결정되는 Smagorinsky 식 (Smagorinsky, 1963)을 통해 식(3.18)과 같이 계산되며, 일반적으로 수평 난류 점성계수와 수평 난류 확산계수는 같다고 본다.

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

여기서, C 는 실험 상수로 0.1~0.2의 값이 사용되며, 계산격자가 충분히 작은 경우 무시될 수 있다. Smagorinsky 식은 격자의 크기가 작아질수록, 유속 경사가 작을수록 수평 난류 점성계수 또한 감소한다(Mellor, 1998).

나. 유사 이송 해석

EFDC 모형의 수층 내 부유사의 입경별 이류·확산 방정식은 식(3.19)와 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial (uC_i)}{\partial x} + \frac{\partial (vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial (wC_i)}{\partial z} - \frac{\partial (w_{s,i}C_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + Q_{C_i}^E \quad (3.19)$$

여기서, C_i 는 퇴적물의 농도(g/m^3), i 는 퇴적물의 입경 계급, $w_{s,i}$ 는 퇴적물의 침강속도(m/s), $Q_{C_i}^E$ 는 퇴적물의 외부 생성-소멸항을 나타낸다. 수층 내 부유사에 대한 이류·확산 방정식에서 이류항은 고차원 전방차분법을 통해 해석하며, 이는 Hamrick(1992)과 Tetra tech(1992)에 제시되어 있다. 위 식(3.19)에서 수직 경계 조건은 아래의 식(3.20)~식(3.22)와 같이 정의된다.

$$-K_V \frac{\partial C_i}{\partial z} - w_{s,i} C_i = J_{s,i} \quad \text{if } z = -h \quad (3.20)$$

$$-K_V \frac{\partial C_i}{\partial z} - w_{s,i} C_i = 0 \quad \text{if } z = \eta \quad (3.21)$$

$$J_{s,i} = E_i - D_i \quad (3.22)$$

여기서, $J_{s,i}$ 는 저면 경계를 통한 순수 퇴적물의 이동률, E_i 는 저면 경계를 통한 침식률, D_i 는 저면 경계를 통한 퇴적률을 의미한다. 수면을 통한 유사의 이동은 없는 것으로 가정하고, 저면 경계에서의 퇴적물 이동은 침식과 퇴적으로 저면 전단응력과 입도, 전밀도, 공극률 등과 같은 퇴적물 특성에 의해서 결정되는 저면 퇴적물의 저항력, 즉 한계 전단응력을 통해 결정된다. 특히, 퇴적물이 점착성(cohesive)인가 비점착성(noncohesive)인가에 따라서 다른 형태의 침식, 퇴적, 이동 과정을 나타낸다(Tetra tech, 1992).

다. 유사 침식·퇴적 해석

EFDC 모형에서 점착성 퇴적물의 퇴적률(D_i)와 침식률(E_i)은 식 (3.23)~식(3.24)를 통해 계산된다(Tetra tech, 1992).

$$D_i = \begin{cases} w_{s,i} C_{1,i} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd,i}}\right) & \text{if } \tau_b < \tau_{cd,i} \\ 0 & \text{if } \tau_b \geq \tau_{cd,i} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$E_i = \begin{cases} M_{0,i} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce,i}} - 1\right)^\Upsilon & \text{if } \tau_b \geq \tau_{ce,i} \\ 0 & \text{if } \tau_b < \tau_{ce,i} \end{cases} \quad (3.24)$$

여기서, $C_{1,i}$ 는 바닥층의 퇴적물 농도(mg/L), $\tau_{cd,i}$ 는 퇴적한계 전단응력 (N/m^2), $M_{0,i}$ 는 기준 침식률($g/m^2/s$), $\tau_{ce,i}$ 는 침식한계 전단응력(N/m^2), Υ 는 침식률 계수를 나타낸다. 이때, 침강속도 $w_{s,i}$ 는 퇴적물 농도의 지수함수로 식(3.25)와 같이 계산된다(Ariathurai and Krone, 1976).

$$w_{s,i} = w_{0,i} \left(\frac{C_i}{C_{0,i}}\right)^{\gamma_0} \quad (3.25)$$

여기서, $w_{0,i}$ 는 기준 침강속도(m/s), $C_{0,i}$ 는 표준 농도(mg/L), γ_0 는 침강 계수를 나타낸다.

비점착성 퇴적물의 퇴적, 침식, 이동 형태는 퇴적물의 침강속도($w_{s,i}$), 외력에 의한 전단속도(u^*), 퇴적물 특성에 의해서 결정되는 한계 전단속도(u_{ce}^*) 간의 관계를 통해서 결정된다(van Rijn, 1984). EFDC 모형에서 저면 경계를 통한 비점착성 퇴적물의 퇴적, 침식(부유)에 의한 퇴적물의 순 이동량은 식(3.26)~식(3.29)를 통해 계산한다(Tetra tech, 1992).

$$J_{s,i} = w_{s,i} \left(\frac{2(1+R_i)}{2+R_i(1-z_{eq,i})} \right) (C_{1,eq,i} - C_{1,i}) \quad (3.26)$$

$$R_i = \frac{w_{s,i}}{u^* k} \quad (3.27)$$

$$C_{1,eq,i} = \begin{cases} \frac{\ln(\Delta z_{eq,i}^{-1})}{(\Delta z_{eq,i}^{-1} - 1)} C_{eq,i} & \text{if } R_i = 1 \\ \frac{[(\Delta z_{eq,i}^{-1})^{1-R_i} - 1]}{(1-R_i)(\Delta z_{eq,i}^{-1} - 1)} & \text{if } R_i \neq 1 \end{cases} \quad (3.28)$$

$$\Delta z_{eq,i} = \frac{z_{eq,i}}{H} \quad (3.29)$$

여기서, $R_{x,i}$ 는 라우즈 파라미터(Rouse parameter), $C_{1,eq,i}$ 는 바닥층의 평형농도(mg/L), $\Delta z_{eq,i}$ 는 평형농도가 정의되는 무차원 높이, $C_{eq,i}$ 는 유체 역학적 요소와 퇴적물의 물리적 특성을 통해서 계산되는 평형농도(mg/L), $z_{eq,i}$ 는 $C_{eq,i}$ 가 정의되는 높이(m)를 의미한다. EFDC 모형에서는 Smith and Mclean(1977), van Rijn(1984), Gracia and Parker(1991)의 식에 의한 평형농도($C_{eq,i}$)와 기준높이($z_{eq,i}$)를 택하여 사용할 수 있다(Tetra tech, 1992).

3.3. 유사 저감 대책

본 연구에서는 발생원 유사 관리를 위해 토지 이용별로 밭으로 분류된 지역은 등고선 재배와 부초 멀칭을 적용하였으며, 나지로 분류된 지역은 식생을 조성하였다. 발생원 관리를 통한 유사 저감 효과는 SWAT 모형을 통해 구현하였으며, 토양 유실과 관련된 요인 중 관리가 가능한 식생(USLE C) 및 보전·관리(USLE P) 인자를 변경하여 Table 3.2.와 같이 적용하였다.

Table 3.2. Sediment management of generating source

Landuse	Method	Parameter	Range
Upland	Contour tillage	USLE_P	0.6~0.8 ^a
		CN2	61~70 ^b
	Weed mulching	USLE_C	0.012 ^c
Barren	Vegetation covering	USLE_C	0.005 ^b

a Wischmeier and Smith, 1978

b Arnold et al., 2013

c Van Doren et al., 1984

본 연구에서는 유역 말단에 가상의 저류지를 구현하여 배출원의 유사 관리 시나리오를 적용하고자 한다. 본 연구 대상지의 상류 유역은 이미 식생수로에 가까우며, 추가적인 식생은 홍수 시 통수능을 방해하여 마을 침수 등에 영향을 줄 수 있다고 사료되어 배출원 관리를 위해 식생 수로의 설치는 고려하지 않았다. 또한 본 연구 대상지의 상류 유역은 홍수기를 제외하면 건천이 지속되어 인공습지를 위한 일정 수위의 확보가 힘들 것으로 사료되어 인공습지의 설치를 고려하지 않았다.

저류지의 적용을 위해서 저류용량과 저류지 수표면적 등의 규모를 산정한 후, SWAT의 reservoir 기능을 통해 유역 말단에 가상의 저류지를 조성하여 저류지 설치를 통한 유사 저감 효과를 모의하고자 한다. 저류용량은 Brune (1986)의 유사 제거 효율(Trap Efficiency; TE) 곡선에 따른 저류지 저장용량 대비 연간 유입량의 비율을 고려하여 유사제거효율이

30~90%일 때의 용량을 산정하였다. Fig. 3.10.은 Brune 곡선을 이용하여 저류지 용량을 산정하는 예시이다.

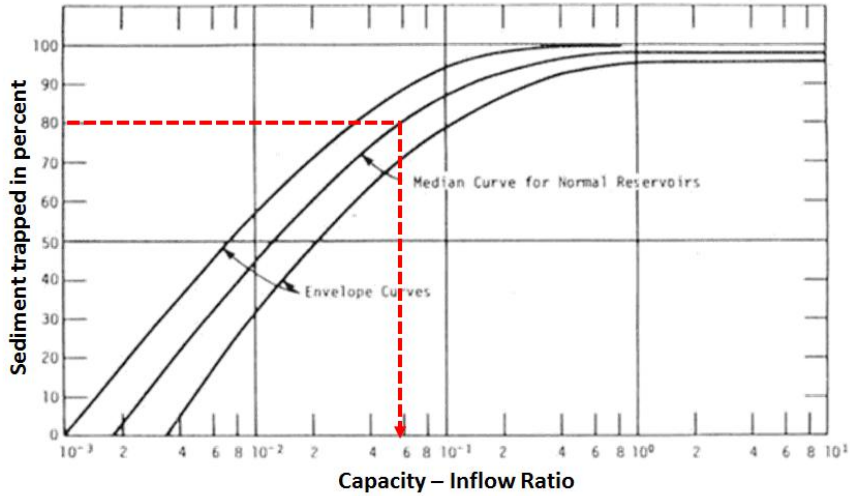


Fig. 3.10. Estimation of retention pond's capacity using Brune's curve

저류지 수면적은 Goldman et al. (1986)이 개발한 수(표)면적 공식을 토대로, 특정 입경을 가진 유사의 침강속도 및 침사지 유입량을 고려하여 수면적을 산정하였다.

$$A = 1.2 Q / V_s \quad (3.34)$$

$$V_s = \frac{g(S-1)d_s^2}{18\nu} \quad (3.35)$$

여기서, $A(m^2)$ 는 저류지 수면적, $Q(m^3/s)$ 는 10년 빈도 지속시간 6시간의 확률홍수량, $V_s(m/s)$ 는 Stokes 법칙을 이용한 침강속도, $g(9.8m/sec^2)$ 는 중력가속도, S 는 토사의 비중 2.65, ν 는 물의 동점성계수 $1.007 \times 10^{-6} m^2/sec$ 그리고 $d_s(m)$ 는 토양의 입경을 나타낸다.

제 4 장 수문 모형과 수리 모형을 이용한 유사 해석

4.1. SWAT 모형

4.1.1. 입력 자료 구축

가. 지형 자료

SWAT 모형의 구축은 입장저수지 상류유역인 양대천(YANG)과 무명천(NNM)에 대해 각각 구축하였다. 지형 자료 구축을 위해 DEM, 토양도, 토지이용도를 이용하였으며, 세 가지 지형 자료를 고려하여 수문·수질 모의를 위한 단위인 소유역 및 HRU를 나누었다. 소유역 경계는 DEM을 기반으로 하천의 출구점을 기준으로 나뉘며, HRU의 경계는 토지 이용, 토양, 경사를 고려하여 나누어진다. HRU의 경계는 사용자가 임계치(threshold)를 설정하여 조절할 수 있으며, 특별히 임계치를 설정하지 않으면 유역의 고유한 지형 특성을 반영하여 세밀하게 나눌 수 있다. 일반적으로 모의의 편의성을 위해 임계치는 5~15%가 사용되고 있으며(Her et al., 2015), 본 연구에서는 HRU 생성을 위한 토지이용, 토양, 경사의 임계치를 각각 10%로 설정하였다. SWAT 모형을 이용해 소유역도를 구축한 결과 Fig. 3.11.과 같이 나타났으며, 양대천의 경우 17개 소유역, 104개의 HRUs로 구축하였고, 무명천의 경우 1개 소유역, 13개의 HRUs로 구축하였다.

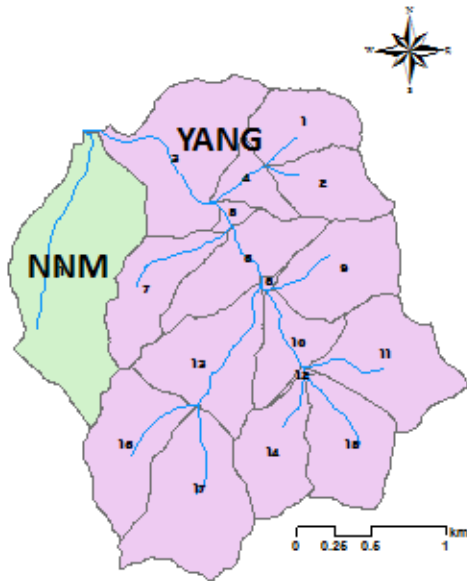


Fig. 3.11. Sub-watershed map of the Ipjang watershed using SWAT

나. 기상 자료

SWAT 모형에서 기상 자료의 입력은 두 가지 형태로 구분된다. 보정 및 검정을 위해 모의 기간에 해당하는 기상 자료를 일별로 입력해주는 형태와 수질 예측을 위한 기상 발생을 위해 15년 이상 관측 기상자료를 통계 분석하여 입력해주는 형태이다. 본 연구에서는 2007년~2017년(10월 31일까지)의 일별 기상자료를 이용하였다. 기상 요소별로 최고기온, 최저기온, 평균풍속은 하개정 AWS(Automatic Weather System) 자료를 이용하였고, 일사량은 청주 기상대의 자료를 이용하였으며, 평균상대습도와 이슬점 온도는 천안 기상대의 자료를 이용하였다. 강우량은 유역의 유출을 직접적으로 유발하므로, 정확한 강수량의 확보는 정밀한 유역 모델링의 가장 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 유역에서 가장 근접한 서운 AWS의 강수량 자료를 수집하여 SWAT모형의 입력 자료로 이용하였다(Table 4.1.).

Table 4.1. Weather data type and source for SWAT model

Data	Type	Source
Rainfall	Daily sum (<i>mm</i>)	Seoun AWS (MLTMA ^a)
Temperature	Daily minimum and daily maximum (°C)	Hgaejung AWS (KMA ^b)
Wind velocity	Daily average (<i>m/s</i>)	
Relative humid	Daily average (%)	
Dew-point temperature	Daily (°C)	Cheonan (KMA ^b)
Solar radiation	Daily sum (<i>MJ/m²</i>)	Cheongju (KMA ^b)

a Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

b Korea Meteorological Administration

다. 모형의 보정 방법

본 연구에서는 수문·수질 모형의 매개변수를 시행착오법을 통해 도식적 그래프와 통계적 지표의 일치 정도를 확인하여 만족할만한 결과를 얻을 때까지 수동 보정하였다. 사용된 통계적 지표로는 R^2 , $RMSE$ (Root Mean Square Error), NSE (Nash and Sutcliffe Efficiency) 그리고 $PBIAS$ 를 이용하였으며, 각각 식(4.1)~식(4.4)를 통해 산정된다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \quad (4.2)$$

$$NSE = 1 - \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2)}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)} \quad (4.3)$$

$$PBIAS = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i) \right]} \quad (4.4)$$

여기서, O_i 와 P_i 는 각각 i 시점에서의 실측치 및 모의치를 의미하며, \bar{O} 와 \bar{P} 는 각각 실측치와 모의치의 평균, 그리고 n 는 자료 개수를 의미한다.

모형의 보정 및 검정과정에서 중요한 요인 중 하나는 통계적 성능 평가 기준을 설정하는 것이다. Moriasi et al. (2015)은 수많은 선행연구에서의 모의 및 평가된 결과를 바탕으로 통계분석을 수행하여 모형의 성능 평가 기준을 개발하였으며 Table 4.2.와 같다. Moriasi et al. (2015)의 기준은 공간 규모(watershed, field) 및 모의대상(flow, sediment, nitrogen, phosphate)별로 통계적 지표(R^2 , NSE , $PBIAS$)에 따라 “Very Good”, “Good”, “Satisfactory”, 그리고 “Not Satisfactory”로 각각 구분되어 있으며, 일단위·월단위·연단위 등 시간 간격에 따른 적용 가능 여부도 기재되어 있다(송정현, 2017). 본 연구에서는 Moriasi et al. (2015)가 제시한 기준을 준용하였다.

Table 4.2. Evaluation criteria for the recommended statistical performance measures for watershed-scale models (Moriassi et al., 2015)

Measure	Output response	Temporal scale ^a	Performance Evaluation Criteria			
			Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
R^2	Flow ^b	D-M-A	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$
	Sediment	M	$R^2 > 0.80$	$0.65 < R^2 \leq 0.80$	$0.40 < R^2 \leq 0.65$	$R^2 \leq 0.40$
	N/P ^c	M	$R^2 > 0.70$	$0.60 < R^2 \leq 0.70$	$0.30 < R^2 \leq 0.60$	$R^2 \leq 0.30$
NSE	Flow	D-M-A	$NSE > 0.80$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$
	Sediment	M	$NSE > 0.80$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$0.45 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.45$
	N/P	M	$NSE > 0.65$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.35 < NSE \leq 0.50$	$NSE \leq 0.35$
$PBIAS$	Flow	D-M-A	$PBIAS < \pm 5$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$PBIAS \geq \pm 15$
	Sediment	D-M-A	$PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 20$	$PBIAS \geq \pm 20$
	N/P	D-M-A	$PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 20$	$\pm 20 \leq PBIAS < \pm 30$	$PBIAS \geq \pm 30$

a D, M, and A denote daily, monthly, and annual temporal scales, respectively.

b includes stream flow, surface runoff, base flow, and tile flow, as appropriate, for watershed-and field-scale models.

c where there were no differences, performance evaluation criteria were grouped for the output response.

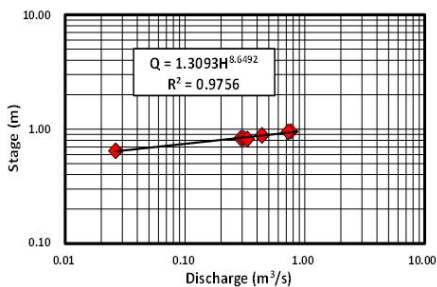
4.1.2. 모형의 보정

가. 유출량

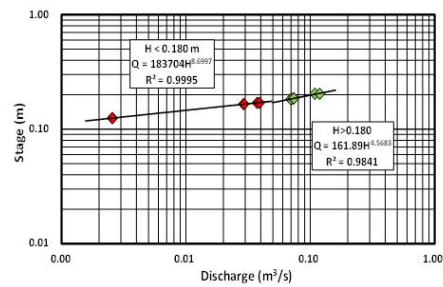
SWAT 모형으로 모의한 유출량을 보정하기 위한 실측치는 양대천(YANG)과 무명천(NNM)의 수위 모니터링을 통해 수집하였다. 양대천과 무명천 말단에 부자식 수위계를 설치하여 2017년 7월~10월까지의 10분 간격의 수위 자료를 수집하였다. 관측된 수위는 현장에서 측량한 유량 자료를 통해 수위-유량 관계식을 개발하여 수위를 유량으로 환산하였으며, 이는 SWAT 모형의 유출량 보정에 이용하였다. Table 4.3.은 양대천과 무명천 유역의 수위-유량 관계식을 나타내며, Fig. 4.1.은 양대천과 무명천의 수위-유량 관계식을 도시하고 있다.

Table 4.3. Stage-discharge relationships at the YANG and NNM watershed

Station name	Rating curve	R^2
YANG	$Q = 1.3093 H^{8.6492}$	0.98
NNM	$Q = 183704 H^{8.6997} (H < 0.18 m)$	0.99
	$Q = 161.89 H^{4.5683} (H \geq 0.18 m)$	0.99



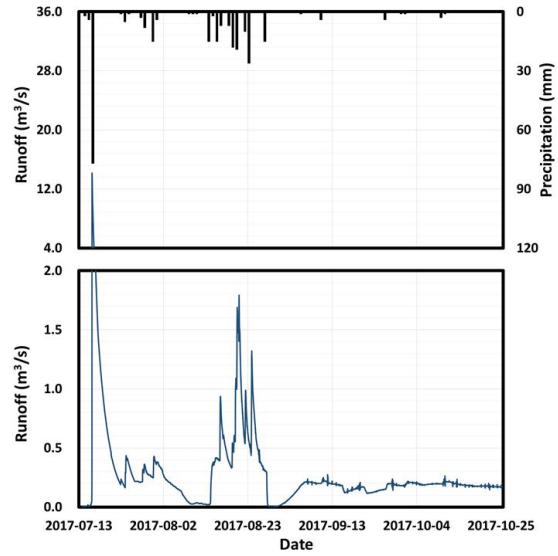
(a) YANG



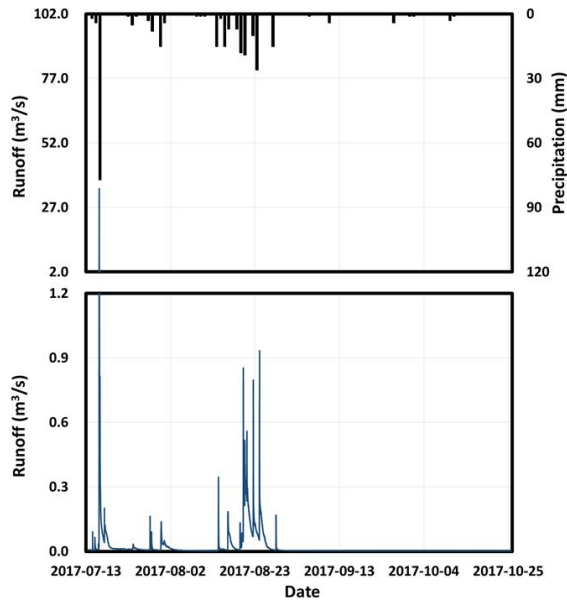
(b) NNM

Fig. 4.1. Stage-discharge relationships

Fig. 4.2.는 양대천과 무명천의 수위-유량관계식을 통해 산정한 유량을 나타내고 있다. 양대천의 경우 8월 초순과 9월 초순에 약 5일 정도 유량이 감소하여 일정하게 유지되는 시기가 있었으며, 이는 저수지의 방류로 인한 영향으로 사료된다. 이 시기 이후에 유량은 다시 상승하여 일정하게 유지되며, 이는 저수지로부터의 배수(backwater)로 인한 영향으로 사료된다.



(a) YANG



(b) NNM

Fig. 4.2. Calculated discharge from stage-discharge relationship

모형의 유출량에 대한 보정은 시행착오법을 사용하였으며, 수문·수질에 비교적 큰 영향을 주는 매개변수를 선택하여 보정하였다. 모형의 보정 과

정에서는 유량, 유사, 수질이 상호 연계되는 점을 고려하여 국내 연구자들이 사용한 매개변수를 참고하여 물리적 허용범위 내에서 변환시키며 조정하였다. 주요 매개변수는 Table 4.4.와 같다.

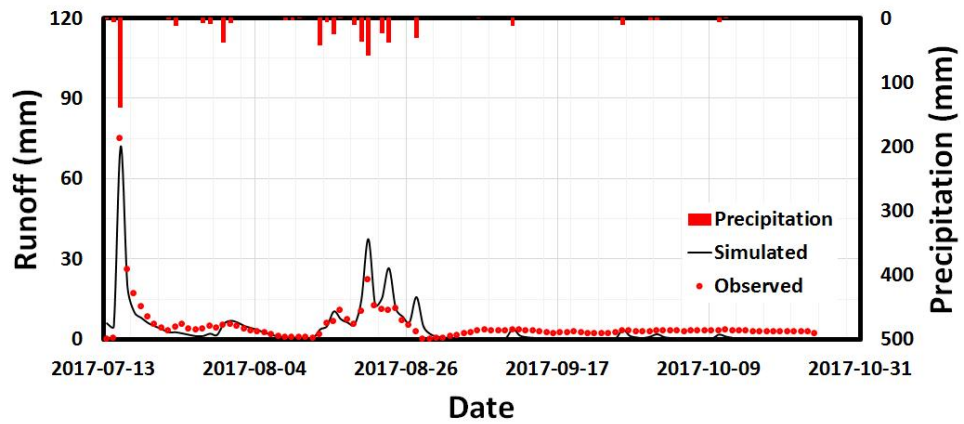
Table 4.4. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the study watershed

File	Parameter	Definition	Range	Default	Calibrated	
				Value	YANG	NNM
.gw	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	0.0~1.0	0.048	0.75	0.7
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0.0~5,000	1000	5000	5000
.gw	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02~0.2	0.02	0.2	0.2
.gw	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0.0~1.0	0.05	0.0004	-
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.95	0.9	-
.hru	SLSUBBSN	Average slope length	10~150	9.1 ~91.5	-	×0.5
.rte	CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-0.01~0.3	0.014	0.2	0.2
.rte	CH_COV	Channel cover factor	0.0~1.0	0	0.2	-
.rte	CH_EROD	Channel erodibility factor	-0.05~0.6	0	0.3	-
.rte	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01~150	0	100	50
.sol	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0.0~0.32	0~0.32	0.27	-

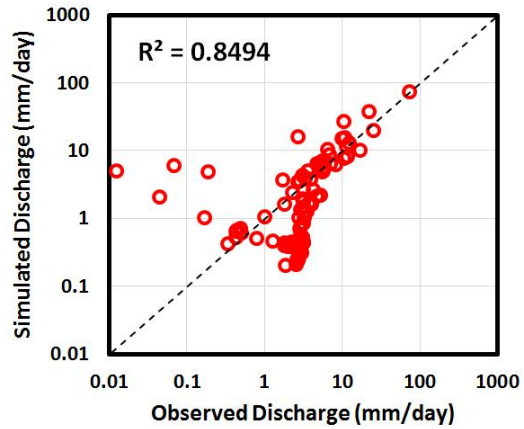
양대천 지점과 무명천 지점의 수문 모니터링 결과를 통해 보정된 매개변수를 이용하여 모형의 유출량에 대해 보정한 결과, 양대천 지점의 경우 R^2 은 0.85, $RMSE$ 는 3.46 mm, NSE 는 0.81 그리고 $PBIAS$ 는 0.14% 나타났으며, 무명천 지점의 경우 R^2 은 0.90, $RMSE$ 는 4.26 mm, NSE 는 0.82 그리고 $PBIAS$ 는 -0.93% 로 나타나, 모의 유출량이 실측 유출량을 비교적 잘 모의

하는 것으로 분석되었다(Moriasi et al., 2015).

모형의 적합성은 통계적 변량을 사용하는 것도 중요하지만 모의치와 실측치의 비교 그림을 통해서도 파악할 수 있다. Fig. 4.3.과 Fig. 4.4.는 각각 양대천(YANG)과 무명천(NNM)의 유출량 보정 결과를 도시하고 있으며, 전반적으로 강우-유출 응답 반응이 잘 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 양대천의 경우 9월 이후의 실측 유량은 저수지의 배수(backwater) 현상으로 인해 비교적 높게 유지되나, 모형을 통해서도 유역 말단에 위치하는 저수지의 영향을 고려하지 못하므로 이를 정확히 모사하기 어려운 것으로 사료된다.

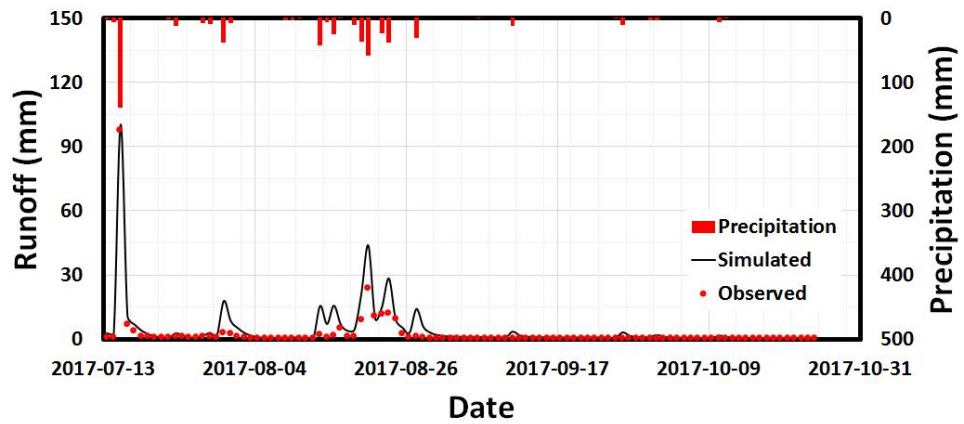


(a) Time series plots at the YANG watershed for calibration

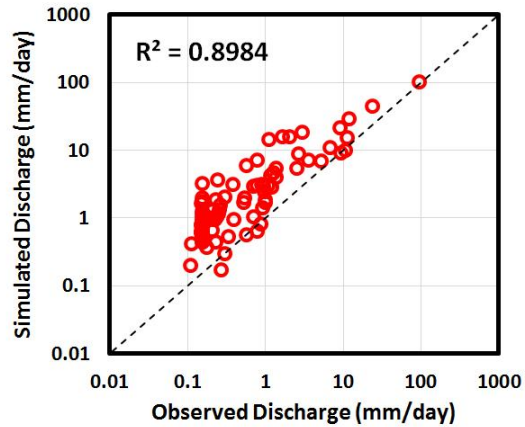


(b) Scatter plots at the YANG watershed for calibration

Fig. 4.3. Observed and simulated daily stream flow at the YANG watershed for calibration



(a) Time series plots at the NNM watershed for calibration



(b) Scatter plots at the NNM watershed for calibration

Fig. 4.4. Observed and simulated daily stream flow at the NNM watershed for calibration

나. 유사량

SWAT 모형으로 모의한 유사량을 보정하기 위한 자료는 양대천(YANG)과 무명천(NNM)의 수질 모니터링을 통해 수집하였다. 양대천과 무명천에 대해 2017년 7월~10월의 부유사 농도 수질 측정 자료를 이용하였다. 그러나 폭우 시 부유사 농도는 폭우 사상 전체의 부유사 농도를 대표하지 못하므로 단일 폭우사상에 대하여 샘플링 된 한, 두 점의 부유사 농도를 이용하여 유사량을 계산하는 것은 오차의 변위가 크게 나타날 우려가 있다(강문성, 2002; 정한석, 2014). 따라서 본 연구에서는 유량의 변화에 따른 유사량의 관계를 나타내는 유사량-유량 관계식을 개발하여 SWAT 모형의 유사량을 보정을 위한 자료로 사용하였다. 양대천과 무명천 유역의 유사량-유량 관계식은 Table 4.5와 같으며, Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 각각 양대천과 무명천의 유사량-유량 관계식을 도시하고 있다.

Table 4.5. Load-discharge relationships at the YANG and NNM watershed

Station name	Rating curve	R^2
YANG	$SS = 0.1330 Q^{1.3105}$	0.70
NNM	$SS = 0.1746 Q^{1.4259}$	0.87

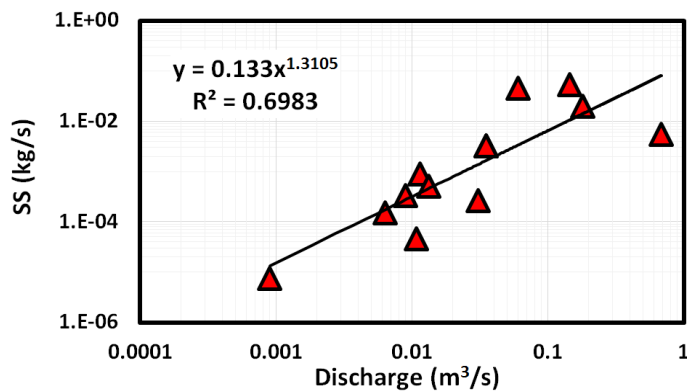


Fig. 4.5. Load-discharge relationships developed for suspended solids (SS) at

the YANG watershed

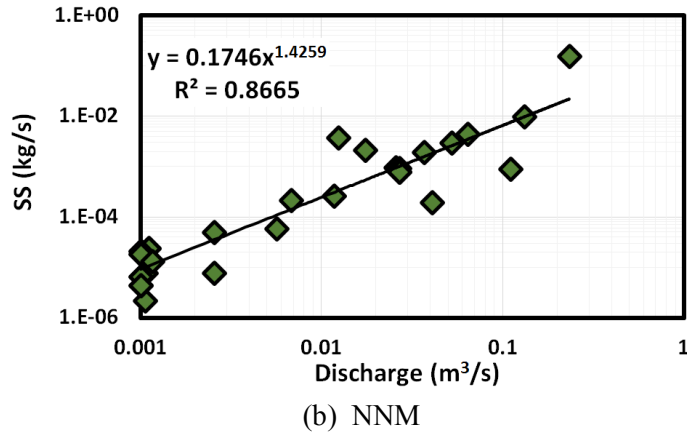


Fig. 4.6. Load-discharge relationships developed for suspended solids (SS) at the NNM watershed

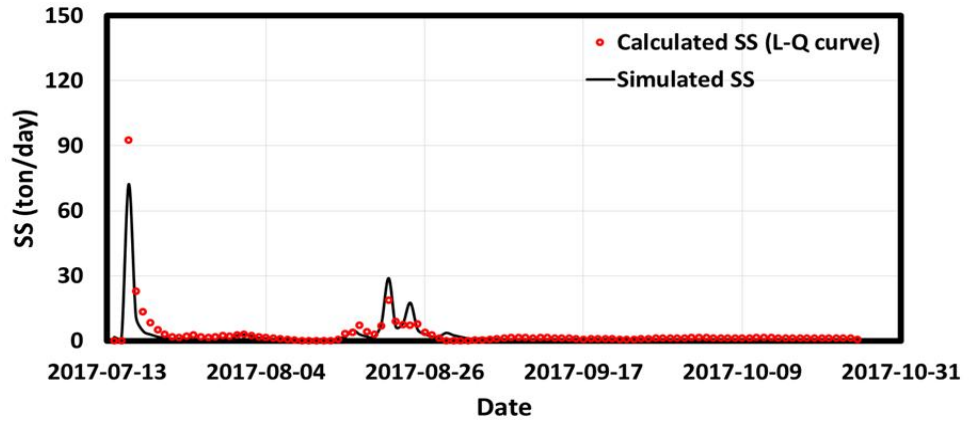
SWAT 모형을 이용한 일별 유사량의 추정에는 R^2 , NSE , $PBIAS$ 를 목적함수로 하여, SPCON, PRF, SPEXP, USLE_C 인자 등으로 보정하였다. 유사량 보정을 위한 주요 매개변수는 Table 4.6.과 같다.

Table 4.6. List of calibration parameters for daily loads of suspended solids (SS) simulation for the study watershed

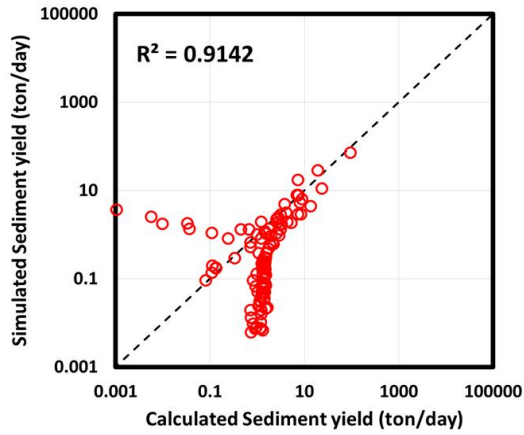
File	Parameter	Definition	Range	Default Value	Calibrated	
					YANG	NNM
.bsn	SPCON	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	0.001~0.01	0.0001	0.00015	0.00015
.bsn	PRF	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	0.0~2.0	1	0.035	0.035
.bsn	SPEXP	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	1.0~1.5	1	1.1	1.1
.dat	USLE_C	Minimum value of USLE C factor for water erosion	0.0~1.0	land covers related	land covers related ^a	land covers related ^a

a Forest and upland were calibrated from 0.001 to 0.05 and from 0.02 to 0.1, respectively.

유사량의 보정을 위한 자료는 유사량-유량 관계식을 통해 계산하였으며, 이때 유량은 수위-유량 관계식을 통해 산정된 실측 유량을 사용하였다. 모형의 유사량에 대해 보정을 수행한 결과, 양대천 지점의 경우에서 R^2 은 0.91, NSE 는 0.89 그리고 $PBIAS$ 는 0.30%로 나타났으며, 무명천 지점의 경우 R^2 은 0.94, NSE 는 0.91 그리고 $PBIAS$ 는 -1.01%로 나타났다. Fig. 4.7.과 Fig. 4.8.은 각각 양대천(YANG)과 무명천(NNM)의 유사량의 보정 결과를 보여주고 있으며, 유사량-유량 관계식에 의한 보정이 잘 이루어진 것으로 나타났다(Moriasi et al., 2015).

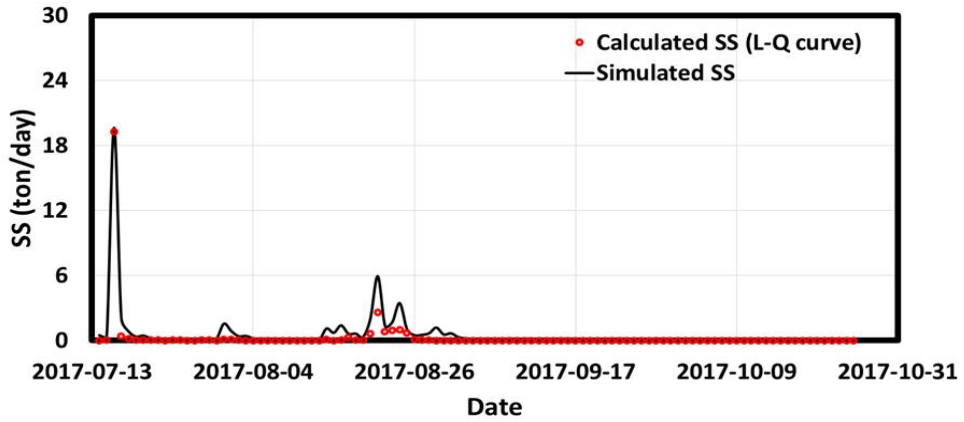


(a) Time series plots at the YANG watershed for calibration

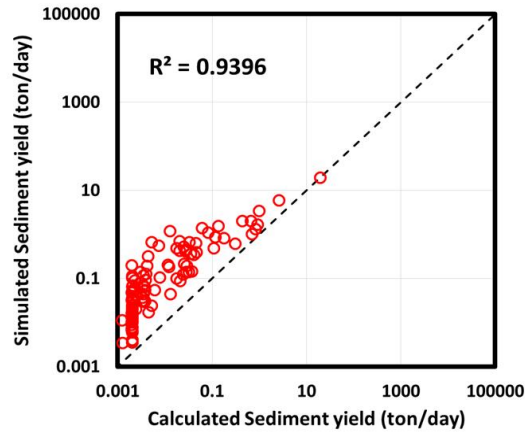


(b) Scatter plots at the YANG watershed for calibration

Fig. 4.7. Calculated and simulated daily loads of suspended solids (SS) at the YANG watershed for calibration



(a) Time series plots at the NNM watershed for calibration



(b) Scatter plots at the NNM watershed for calibration

Fig. 4.8. Calculated and simulated daily loads of suspended solids (SS) at the NNM watershed for calibration

유사량 보정을 수행한 후 양대천과 무명천의 2012~2013년의 연간 유사량을 모의한 결과 Table 4.7.과 같다. 모의 결과 연도별로 소폭 차이가 있으나 0.32~0.87 ton/ha/year로 산정되었다. 이는 국내 산림지를 대상으로 연간 토양 유실량을 추정된 선행연구들이 제시한 범위 내에 속하는 값으로 분석되어, SWAT 모형을 통한 유사량 모의가 적절하게 이루어진 것

으로 사료된다(이현동 등, 2001; 김성수 등, 2002; 원철휘, 2009)

Table 4.7. Comparison of simulated annual loads of suspended solids (SS)

Station	Year	SS load (ton/ha/year)	References
YANG	2012	0.65	This study
	2013	0.55	
	2014	0.52	
	2015	0.37	
NNM	2012	0.87	
	2013	0.75	
	2014	0.76	
	2015	0.50	
-	-	0.004~1.14	Lee et al., 2001
-	-	0.80	Kim et al., 2002
-	-	0.01~0.56	Won et al., 2009

4.2. EFDC 모형

4.2.1. 입력 자료 구축

가. 계산격자망

대상 유역의 수치 해석을 위한 유한차분 격자는 대상 유역을 측량한 수치지도를 기초로 하여 AutoCAD 및 ArcGIS를 이용하여 계산격자망을 구성하였다. 격자체계는 수평방향으로 직교좌표계를 사용하였고, 수직방향으로는 σ -좌표계를 사용하였다. EFDC 모의를 위한 격자 구성은 시행착오를 거쳐 수직 방향 격자는 3개의 등간격층으로 구성하였고, 수평 방향 격자는 153개로 구성하였다(Fig. 4.9.). 격자의 내용적 곡선 및 모의 수위는 실측치와 비교를 통해 검증하였다. 바닥의 표고는 측량된 수치지도로부터 EFDC 내부에서 자동보간 하도록 하였으며, 바닥 표고는 57.3 $El., m \sim 64.7 El., m$ 로 나타났다.

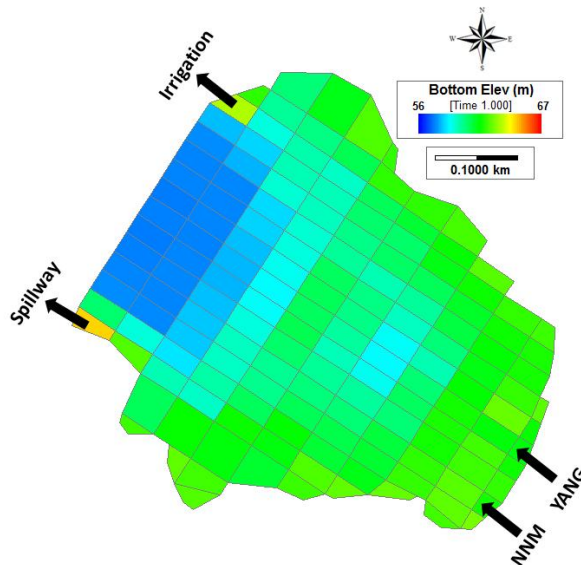


Fig. 4.9. Model grid mesh and bathymetry of the Ipjang reservoir

나. 초기조건 및 경계조건

EFDC 모형의 기상 자료는 SWAT 모형과 동일한 기간의 해면기압, 기온, 습도, 강수량, 증발량, 일사량, 운량 등을 일별로 수집하여 사용하였다. 수리계산을 위한 유입부 경계조건으로 SWAT 모형에서 모의된 양대천(YANG) 지점과 무명천(NNM) 지점의 유량을 설정하였으며, 유출량 경계조건은 농업유역 수문해석 시스템 (Module-based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds; MASA) 모형을 통해 모의된 농업용수 공급량과 수문/물넘이 방류량을 설정하였다. Fig. 4.10.은 본 연구에서 설정한 EFDC 모형의 경계조건의 모식도를 나타낸다.

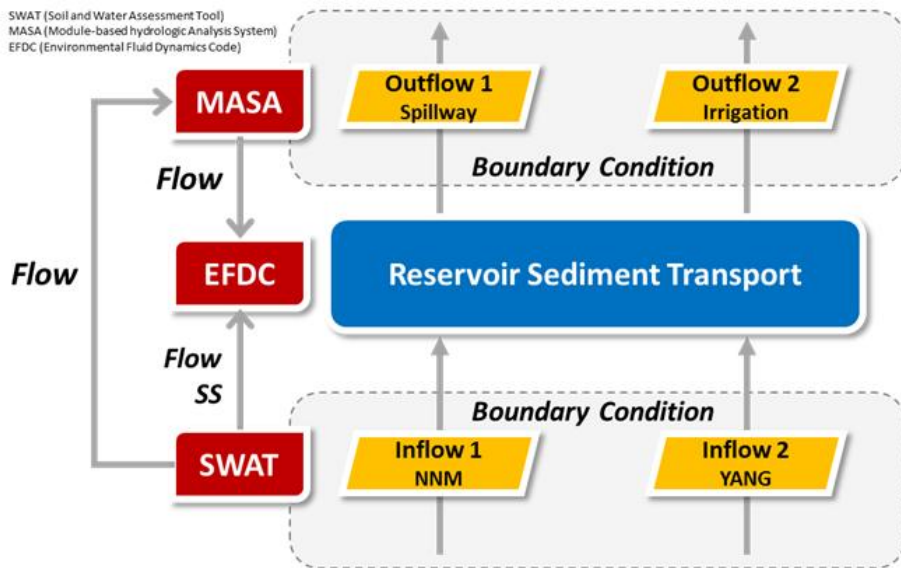


Fig. 4.10. Boundary conditions for sediment transport analysis of the Ipjang reservoir

MASA 모형은 농업유역의 효율적인 물관리와 용수관리 의사결정에 활용 수 있도록 다중목적 최적화 기법을 연계하여 농업유역의 수문현상과

물수지를 해석할 수 있는 시스템이다(송정현, 2017). 본 연구에서는 MASA 모형을 이용하여 저수지 물수지를 모의하였다. 저수지 유입량의 경우 기 보정된 SWAT 모형의 결과를 이용하였으며, 저수지 운영 시기 매 개변수는 실측 저수지 수위의 패턴을 분석하여 추정하였다.

유입부의 부유사 농도를 설정하기 위해서 SWAT 모형에서 모의된 양대천 지점과 무명천 지점의 유사량을 농도로 변환하였다. 이때, 양대천과 무명천 지점의 수질 입도 분석 결과를 반영하였으며, 유사의 조성비가 양대천 유역은 Sand(35.8%), Silt(62.7%), Clay(1.5%)의 비율로 나타났으며, 무명천 유역은 Sand(51.0%), Silt(48.3%), Clay(0.7%)의 비율로 나타났다. 이를 고려하여 EFDC 모형에 입력되는 유사 농도는 비점착성(Sand) 1개와 점착성(Silt) 1개로 나누어 각 지점별로 농도 분율을 고려하여 입력하였다.

유출부의 부유사 농도를 설정하기 위해서 2017년 7월~10월까지 호내 수질 모니터링 자료 중 유출부 인근의 두 지점을 선정하여 Fig. 4.11.과 같이 부유사 농도를 분석하였다.

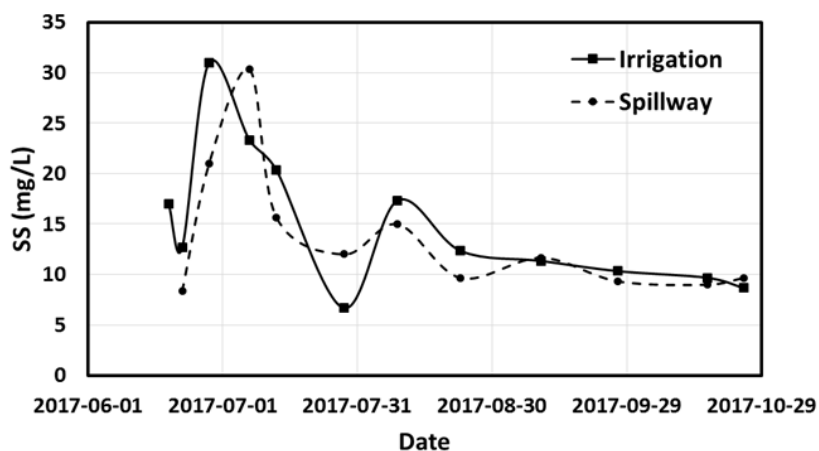


Fig. 4.11. Time series plots of suspended solids (SS) concentration in the vicinity of spillway and intake tower for irrigation

시기별로 농도는 소폭 차이가 있으나, 두 지점 간 부유사 농도의 경향성은 유사하며, 평균 부유사 농도는 관개용수 공급을 위한 취수탑 인근 지점의 경우 15 mg/L, 여수로 인근 지점의 경우 14 mg/L로 나타났다. 장기모의를 위해 유출부의 부유사 농도는 연중 일정한 농도로 가정하였으며, 모니터링 자료의 평균 부유사 농도로 설정하였다.

4.2.2. 모형의 보정

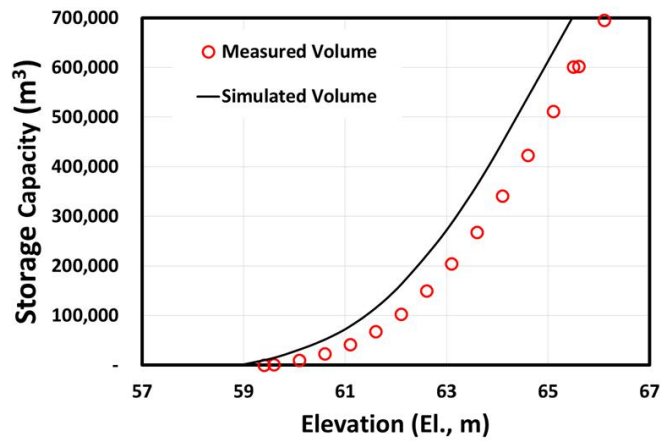
EFDC 모형의 유사 해석에서 모의결과에 크게 영향을 주는 주요한 인자로는 침강속도, 침식률, 퇴적률 등이 있다(이동주와 박영기, 2013). 퇴적물의 이동을 정확히 모의하기 위해서는 각 매개변수들에 대한 현장 및 실험실에서의 실험을 통한 값이 중요하다. 본 연구에서는 선행 연구들의 문헌 조사 등을 통해 관련 매개변수들을 설정하였으며, 주요 매개변수는 Table 4.8.과 같다(Tetra tech, 1999; 류재일, 2010; 방기영, 2013)

Table 4.8. List of calibration parameters for sediment transport simulation for the Ipjang reservoir

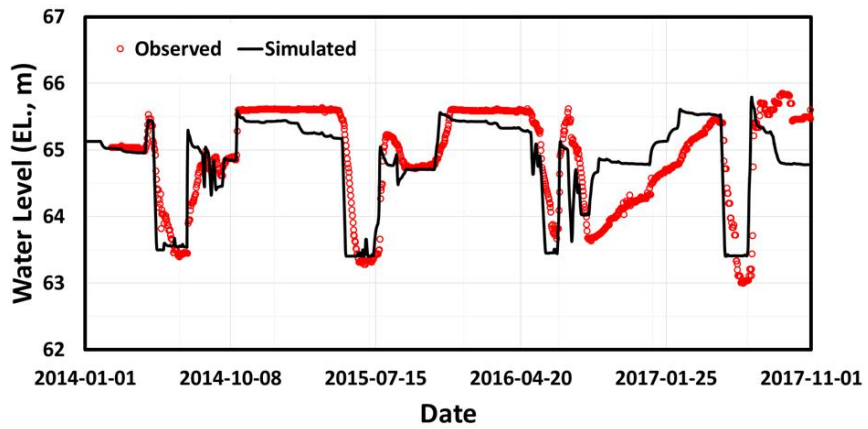
	Parameter	Unit	Value	
			Sand	Silt
	Effective particle size class	<i>mm</i>	0.2349	0.0144
	Settling velocity	<i>mm/s</i>	24.784	0.142
Deposition	Empirical settling constant	-	-	0.0
	Critical shear stress for deposition	<i>N/m²</i>	-	0.08
	Critical shear stress for erosion	<i>N/m²</i>	0.94	0.94
Erosion	Erosion rate	<i>g/m²/s</i>	-	0.0075
	Empirical erosion constant	-	-	2.2
Bedload	Median diameter of bed sediment	<i>mm</i>	0.1467	-
	Angle of repose	°	30.0	-

EFDC 모의 결과인 저수지의 수위를 보정하기 위한 실측 자료는 한국농어촌공사의 초음파 수위계를 통해 2014~2017년 자료를 수집하였다. Fig. 4.12.는 격자의 내용적 곡선 및 수위 모의 자료를 실측 자료와 비교하여 도시한 그림이다. 2017년의 실측 수위 자료의 경우 수위계 자료의 오차 보정 등의 품질 관리가 수행되지 않은 상태이다. 실측 자료의 신뢰성이 낮음에도 불구하고 모형의 보정 기간에서 제외하지 않은 이유는 SWAT 모형의 유출량 및 유사량의 보정이 2017년의 모니터링 자료를 기반으로 수행한 것으로 모형의 보정 기간에서 제외하기 어렵다고 사료되었기 때문이다.

격자의 내용적 곡선은 실측치와 비교하여 R^2 은 0.99, NSE 는 0.94 그리고 $PBIAS$ 는 -18.59%로 나타났다. 저수지 수위의 모의 결과 R^2 은 0.56, $RMSE$ 는 0.48 $EL.m$, NSE 는 0.57 그리고 $PBIAS$ 는 0.02%로 나타났다. 모의 결과 통계적 변량은 소폭 낮으나, 모의치와 실측치의 전체적인 경향성은 비슷하게 나타났다.



(a) Storage-elevation curve



(b) Water surface elevation

Fig. 4.12. Comparison of two grids: Storage-elevation curve and simulated water level

4.3. 유사 저감 대책의 적용

4.3.1. 발생원 관리

가. 토양 유실량의 공간 분포

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 2012~2017년에 대하여 입장저수지 상류 유역의 소유역별 오염총량의 공간적 분포를 해석하였다. 유역 내 토양 유실량의 공간적인 분포 해석을 통해 소유역별 및 토지이용별 유사 발생 점유율을 산정하여 토양유실에 취약한 지점을 파악하였다.

Table 4.9.는 선정된 자료기간에 대하여 SWAT 모형에 의한 연간 유출량 및 유사량의 추정 결과를 보여주고 있다. 연간 유출량은 752~1,105 mm의 범위로 나타났으며, 유출율은 약 58~70%로 나타났다. 이는 대상 유역의 대부분이 산림지로, 일반적인 산림 유역의 특성 상 유출율이 비교적 높게 나타난 것으로 사료된다. 김성재 등(2010)은 산림이 유역 전체 면적의 약 70~80%를 차지하는 3개 유역에 대해 모니터링 관측치를 토대로 유역의 평균 유출율을 산정한 결과 42~76%로 보고한 바 있다.

연간 유사량은 2017년의 경우 410 ton/year로서 두 번째로 큰 값을 보였는데 총 강우량이 많은 해는 아니지만 잦은 폭우의 영향으로 사료된다. 또한 양대천과 무명천의 유사량은 연별로 다소 차이가 있으나 평균적으로 양대천 유역에서 전체 유사량의 약 80%, 무명천 유역에서는 약 20%가 발생하는 것으로 분석되었다.

Table 4.9. Simulated annual loads of suspended solids (SS) for 2012~2017 using SWAT model

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff Ratio (%)	SS (ton/year)		
				YANG	NNM	Total
2012	1,075	740	68.9	367 (81%)	87 (19%)	455
2013	1,105	757	68.5	311 (80%)	75 (20%)	386
2014	994	632	63.6	293 (80%)	76 (20%)	369
2015	797	509	63.9	208 (81%)	50 (19%)	258
2016	752	435	57.9	158 (80%)	39 (20%)	198
2017	868	603	69.5	334 (81%)	76 (19%)	410

Fig. 4.13.은 유역에서 발생하는 토지이용별 유사 발생량 점유율을 보여주고 있다. 유역에서 발생하는 총 유사량 중 토지이용별로 차지하는 비율은 산림이 78.3%, 밭이 11.5%, 나지가 0.001%, 기타 지역(시가지, 초지 등) 10.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 유역에서 가장 큰 면적을 차지하는 산림에서 대부분의 유사가 발생하는 것으로 나타났다.

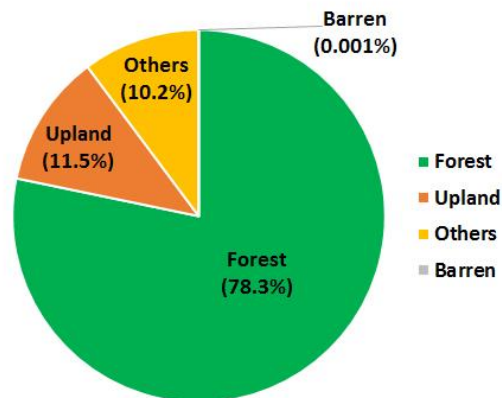


Fig. 4.13. Proportions of SS load discharge to reaches from each land use

앞서 Fig. 3.11.과 같이 대상유역의 소유역은 총 18개의 소유역으로 분할되었으며, 양대천(YANG) 유역은 17개 소유역으로 분할되었고, 무명천

(NNM) 유역은 1개의 소유역으로 분할되었다. Table 4.10.은 18개 소유역에 대하여 각각의 면적과 토지이용 상태의 비율을 나타내고 있다. 18개의 소유역별 면적은 0.99~105.44ha의 범위를 보였으며, 면적이 가장 큰 소유역은 무명천 유역이고, 양대천 유역의 경우 유역 말단에 위치한 3번 소유역으로 나타났다. 각 소유역별 평균 토지이용비율은 산림이 85.7%, 밭이 3.3%, 나지가 0.5%, 기타지역이 10.6%로 나타났다.

Table 4.10. Land use patterns of 18 sub-watersheds at the study watershed

Sub-watershed number	Sub-watershed area (ha)	Land use (%)			
		Forest	Upland	Barren	Others
1	29.4	98.8	0.0	0.0	1.2
2	28.2	100.0	0.0	0.0	0.0
3	67.5	59.0	14.6	1.1	25.3
4	14.2	74.8	7.9	0.0	17.3
5	3.8	36.4	32.2	3.4	28.0
6	37.0	70.0	7.0	0.9	22.1
7	35.4	93.5	2.7	0.1	3.7
8	1.0	33.1	28.3	11.4	27.3
9	41.8	97.3	0.1	0.1	2.6
10	24.7	67.6	10.0	3.5	18.9
11	50.6	95.9	1.0	0.5	2.5
12	1.2	64.4	16.1	2.9	16.5
13	48.6	84.0	2.5	0.3	13.2
14	33.8	97.8	0.5	0.7	1.0
15	42.0	92.5	1.1	0.5	5.9
16	45.1	99.8	0.0	0.0	0.2
17	64.0	100.0	0.0	0.0	0.0
18 (NNM)	105.4	76.2	0.9	0.1	22.8
Sum	673.5	85.7	3.3	0.5	10.6

Fig. 4.14.는 2012~2016년의 소유역별 유사량의 분포를 보여주고 있다. Fig. 4.15.는 2017년의 소유역별 유사량 분포 및 유사량의 점유율이 가장 큰 소유역의 토지 이용 비율을 함께 나타내고 있다. 소유역별 유사량은 2012년에 0.03~8.33 ton/ha, 2013년에 0.02~7.61 ton/ha, 2014년에

0.02~8.18 ton/ha, 2015년에 0~3.89 ton/ha, 2016년에 0~2.73 ton/ha 그리고 2017년에 0.02~6.15 ton/ha의 값을 보였다. 연도별 유사량의 소유역별 오염총량은 강우량이 많은 해일수록(2012~2014년) 전체적인 부하량이 큰 것으로 나타났다.

유사량이 큰 값을 보인 소유역은 모든 자료기간에 대하여 양대천 유역의 5번, 8번, 3번 소유역으로 나타났으며, 특히 3번 소유역의 경우 양대천 유역 말단에 위치하며 면적도 가장 큰 비율을 차지한다. 이들 소유역에서 유사량이 크게 나타난 이유는 다른 소유역에 비하여 토지 이용 중 밭의 비율이 높기 때문인 것으로 사료된다. 소유역별로 토지 이용 중 밭이 차지하는 비율은 5번이 32.2%, 8번이 28.3% 그리고 3번이 14.6% 순으로 높게 나타났다. 이는 일반적으로 밭은 경사지에 위치하는 경우가 많고, 작물이 재배되지 않는 기간이나 고랑 등이 노출되어 있어, 식생이 발달한 산림이나 초지에 비해 토양 침식의 위험성이 크기 때문이다.

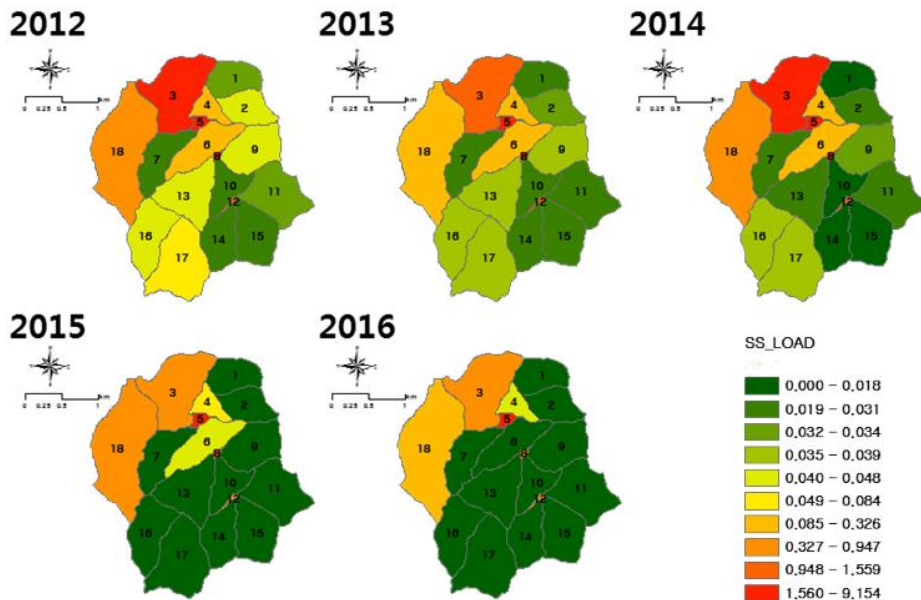


Fig. 4.14. Spatial distributions of annual SS loads in each sub-basin (2012~2016)

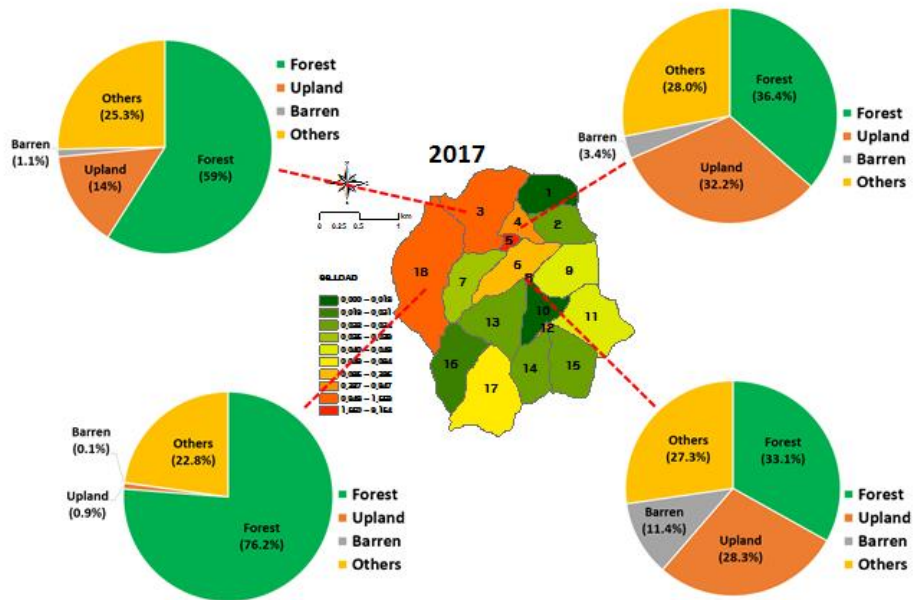


Fig. 4.15. Spatial variations of annual SS loads for 2017 and land use percentages of sub-watersheds which have highest share of total soil loss from the Ipjang watershed

나. 발생원 관리 적용 결과

SWAT 모형을 이용하여 밭과 나지에 대해 발생원 유사 관리를 적용하였을 때의 유사량을 모의하였다. 토양유실과 관련된 요인 중 관리가 가능한 식생 및 보전 관리 인자를 변경하여 적용하였다. 밭의 경우 등고선 재배와 부초 멀칭을 적용하였으며, 나지의 경우 식생 피복 등을 적용하였다. Fig. 4.16.은 2007~2017년간의 유사량 모의 결과를 유사 관리를 적용하지 않은 경우와 발생원 저감 대책을 적용한 경우를 비교한 그림이다. 발생원 유사 저감 대책을 시행할 경우 10년간 약 9.2 ton, 연평균 0.9 ton의 유사량이 저감되는 것으로 나타났으며, 이는 연평균 약 0.2%의 감소 효과를 보였다.

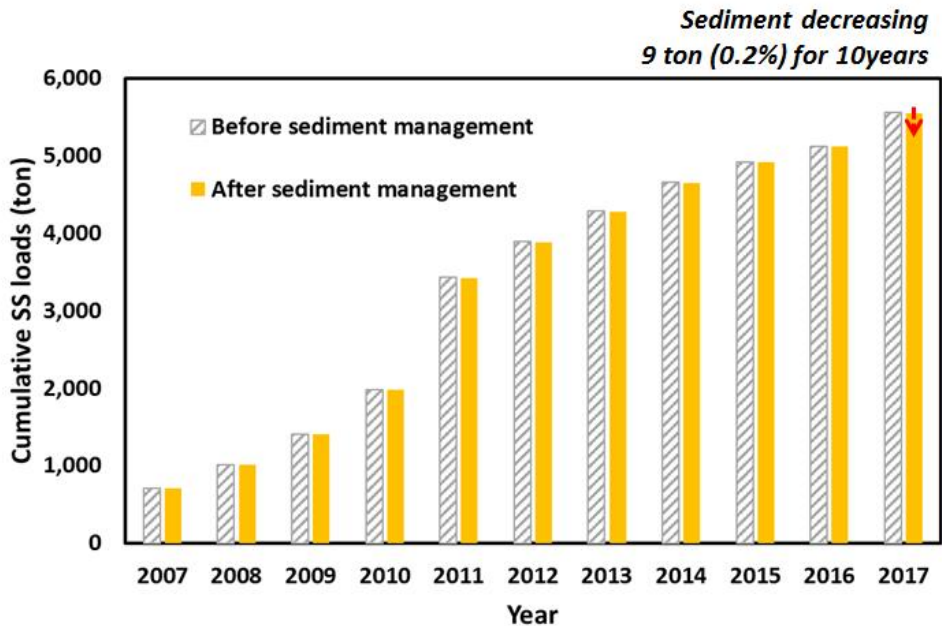


Fig. 4.16. Cumulative SS loads before and after applying sediment management for load generation

발생원 유사 저감 대책을 적용한 결과 큰 효과를 보이지 않았으며, 유사 저감 효과는 미미한 것으로 나타났다. 이는 발생원 유사 관리가 적용된 밭과 나지는 유역 전체 면적의 약 3% 정도로 매우 작은 비율에 불과하기 때문으로 사료된다. 한편, 본 연구에서는 유역의 대부분을 차지하는 산림지에서 발생하는 유사는 배경 농도로서 고려하여, 별도의 저감 대책을 수립하지 않았다. 그러나 산림지는 가장 큰 유사 발생원이므로 적절한 유사 관리 대책이 필요할 것으로 사료된다.

4.3.2. 배출원 관리

대상 유역의 배출원 유사 관리를 위해 유역 말단에 가상의 저류지를 설치하였으며, 저류지 설치를 위해 저류지의 규모를 산정하였다. 저류지 용량의 경우 Brune (1953)의 유사 제거 효율(Trap Efficiency; TE) 곡선에 따른 저류지 저장용량 대비 연간 유입량의 비율을 고려하여 유사제거효율이 30~90%일 때의 용량을 산정하였다(Table 4.11.).

Table 4.11. Estimating the capacity of detention pond according to Brune's curve

TE (%)	C ^a / I ^b	C (m ³)
30	0.006	19,180
40	0.009	30,688
50	0.013	45,334
70	0.031	108,104
90	0.123	428,928

a C is the capacity of detention pond

b I is 2012~2016 annual average inflow simulated by SWAT

저류지 수면적의 경우 Goldman et al. (1986)이 개발한 수(표)면적 공식을 이용하여 산정하였다. 유입량 Q 는 10년 빈도 6시간 확률홍수량으로 산정하였으며, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System)를 통해 모의한 결과 $13.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다. 침강 속도 V_s 를 산정하기 위한 토사입경 d_s 는 양대천의 수질 입도 분석 결과 Sand(35.8%), Silt(62.7%), Clay(1.5%)로 나타나 가는 모래와 실트의 중간 입경인 0.04 mm를 대표 입경으로 적용하여, Stokes 법칙을 통해 산정하였다.

$$V_s = \frac{g(S-1)d_s^2}{18\nu} = \frac{9.8(2.65-1)(0.04 \times 10^{-3})^2}{18 \times 1.007 \times 10^{-6}} = 1.00 m/s \quad (4.5)$$

$$A = 1.2 Q / V_s = 1.2 \times 13.23 / 1.001427 = 7,446 m^2 \quad (4.6)$$

Table 4.12.는 저류지 용량에 따른 유사 저감율을 나타낸 것이다. 2012~2016년의 5년간의 유사 모의 결과를 나타내며, 모의 결과 저류지 용량이 커질수록 유사량은 저감되는 것으로 나타났다. 저류지 설치하지 않은 케이스와 비교하면 5년간 약 379~502 ton의 유사량이 저감되며, 연간 약 22~30%의 저감율을 보이는 것으로 나타났다.

Table 4.12. Sediment reduction rates by different size of detention ponds

Scenarios	Capacity (m ³)	SS loads (ton)	Reduction rate (%)
Before construction	-	1,670	-
Construction	TE ^a =30%	19,180	22.7
	TE=50%	45,334	23.6
	TE=70%	108,104	25.0
	TE=90%	428,928	30.0

a TE is trap efficiency

Fig. 4.17.은 발생원 관리 및 저류지 조성을 통한 배출원 관리 대책을 적용하여 2007~2017년간의 장기 모의를 수행한 결과를 보여준다. 이때 저류지 규모는 수면적 7,446 m², 용량은 TE 40%의 30,688 m³로 적용하였다. 모의 결과 유사 관리를 하지 않을 때와 비교하여 10년간 약 1,372 ton, 연평균 약 125 ton의 유사량이 저감되는 것으로 나타났으며, 연평균 약 25%의 유사량이 감소되는 것으로 나타났다.

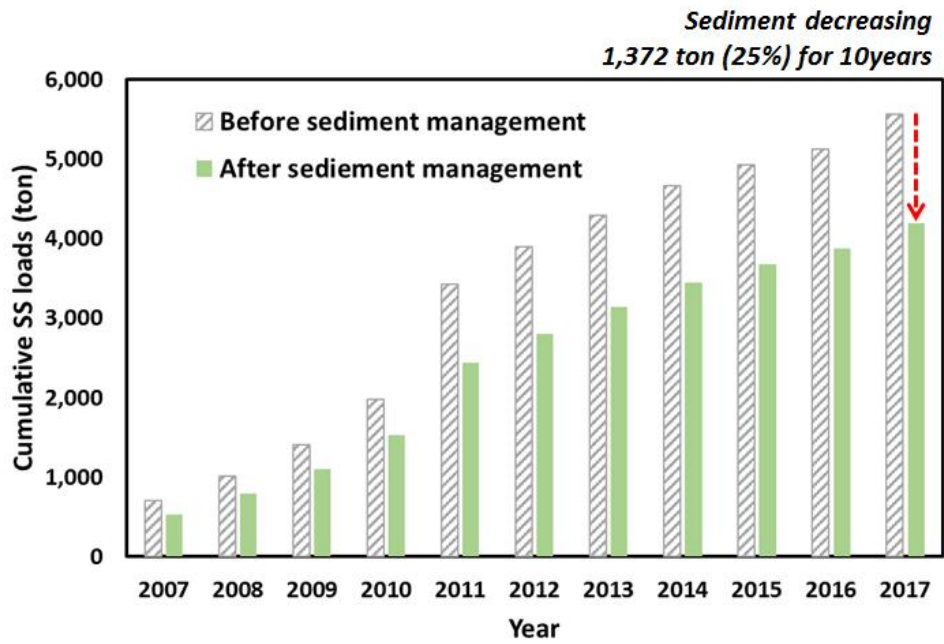


Fig. 4.17. Cumulative SS loads before and after applying sediment management for load discharge

4.4. 유사 관리에 따른 저수지 퇴사 저감 분석

4.4.1. 저수지 내 퇴적 분포

EFDC 모형을 이용하여 2007~2017년간 저수지 내 유사의 퇴적 분포를 모의하였다. Fig. 4.18.은 유사 저감 대책의 시행 없이 현재 상태를 유지하였을 때 10년 후 2017년의 저수지 내 퇴적 분포를 나타낸다. 모의 결과 초기에는 대부분의 유사가 유입부 부근에 퇴적되는 것으로 나타났으며, 시간이 지날수록 제방 근처까지 서서히 퇴적되는 모습을 보였다.

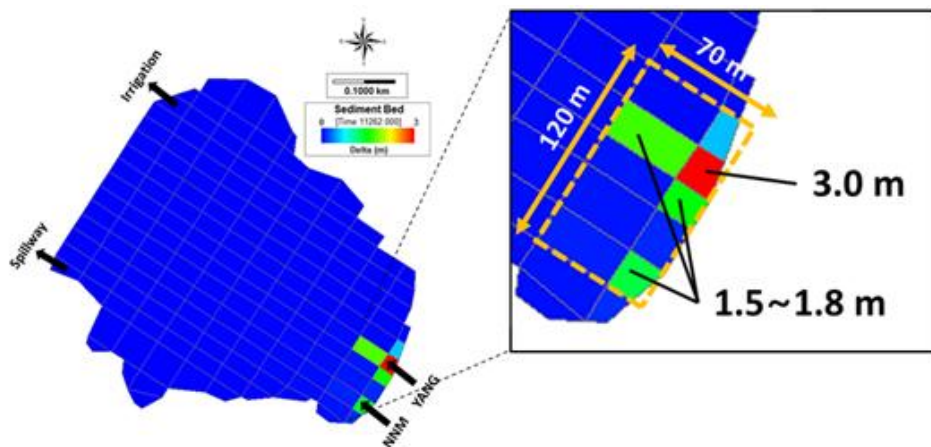


Fig. 4.18. Distribution and height of sediment deposition in the Ipjang reservoir at 2017

대부분의 유사가 유입부 근처에서 퇴적되며, 10년간의 퇴적고는 최대 3 m이며, 주요 퇴적 범위는 약 $8,400 \text{ m}^2$ 으로 나타났다. 이를 통해 저수지 내 유사 관리를 위해 준설 등을 적용할 경우, 유사 유입부 부근의 퇴적토를 우선적으로 부분 준설하는 방안을 고려할 수 있다.

한편, 유입부를 제외한 나머지 지역에서는 토사가 쌓이는 정도가 매우

작아, 유사 저감 대책의 효과를 분석하기 위해 범례를 조정하여 나타내었다. 유사 저감 대책 적용 시 퇴적토의 분포 양상은 비슷하나, 전체적인 Fig. 4.19.와 Fig. 4.20.은 발생원 및 배출원 유사 저감 대책을 적용하였을 때 2007~2017년간 저수지 내에 유사의 퇴적 분포를 나타낸 것이다. 유사 퇴적 분포는 유사 저감 대책을 적용하기 전과 비슷하게 유입부에서 제방 쪽으로 서서히 쌓여가는 양상을 보였으나, 전체적인 퇴적량이 상당히 줄어든 것으로 나타났다.

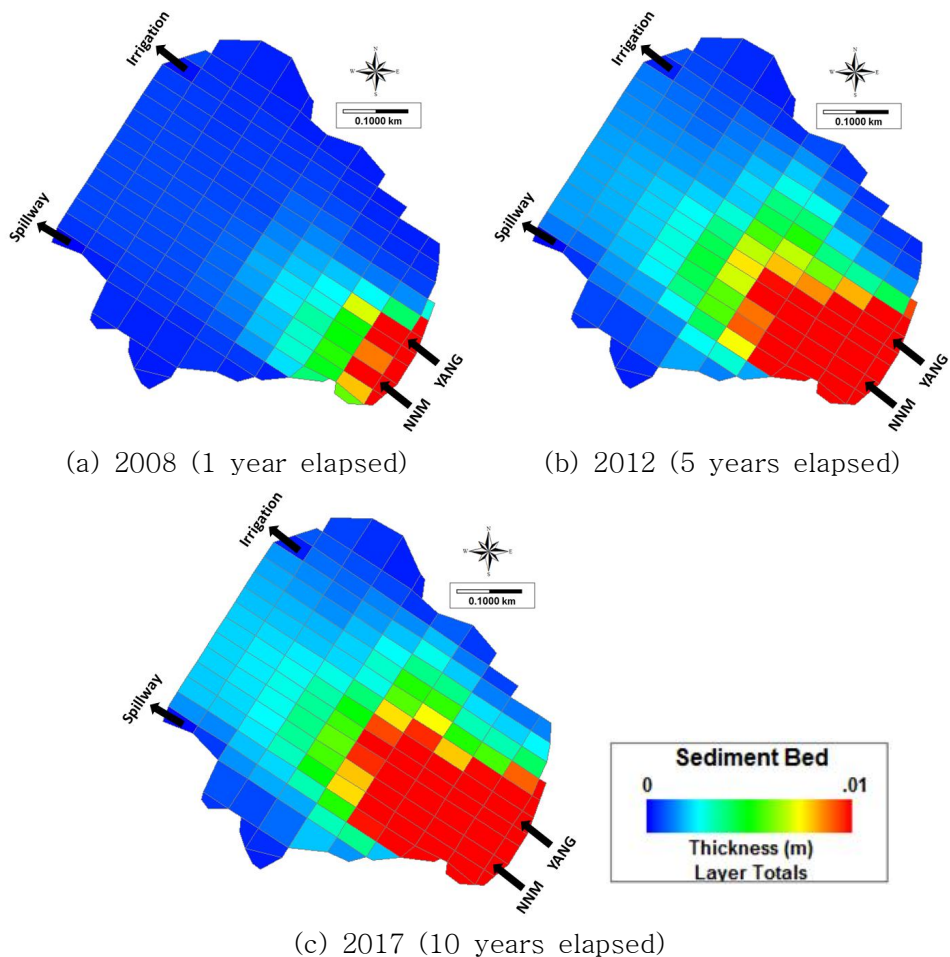


Fig. 4.19. Sediment distribution in the Ipjang reservoir before applying sediment management

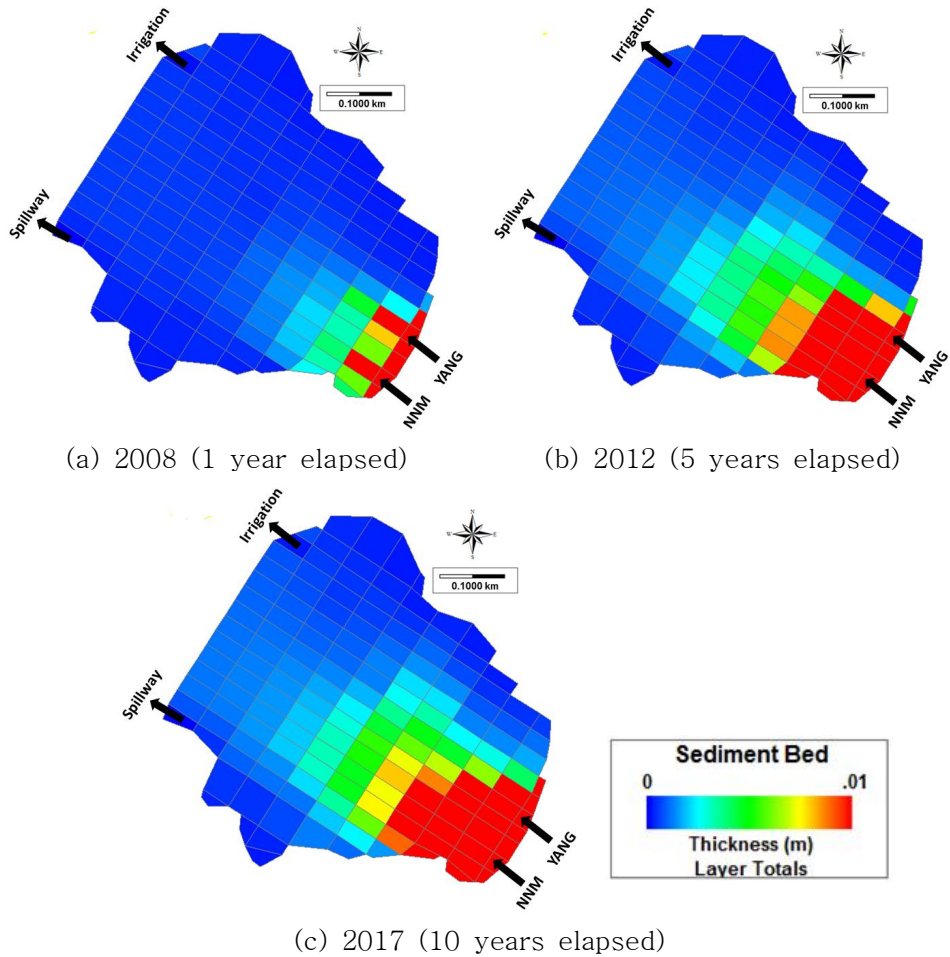


Fig. 4.20. Sediment distribution in the Ipjang reservoir after applying sediment management

4.4.2. 저수지 내 퇴적량

Table 4.13.은 유사 저감 대책을 적용하기 전과 적용 후의 연간 퇴적량 및 포착효율(TE)를 산정한 결과를 나타낸다. 유사 저감 대책을 적용하지 않을 경우에는 연평균 약 412 ton이 퇴적되며, 연간 포착효율은 약 48~95%로 산정되었다. 유사 저감 대책을 적용할 경우에는 연평균 약 297 ton이 퇴적되며, 연간 포착효율은 약 51~89%로 산정되었다. 모의 결과 연도별로 차이는 있지만, 유사 저감 대책을 적용하면 연평균 약 115 ton의 퇴적량이 저감되는 것으로 나타났다.

Table 4.13. Annual sediment deposition and trap efficiency comparing before and after sediment management

Year	Before management			After management		
	Sediment Inflow (ton/year)	Sediment Deposition (ton/year)	TE ^a (%)	Sediment Inflow (ton/year)	Sediment Deposition (ton/year)	TE (%)
2007	709.9	673.3	94.8	532.8	471.7	88.5
2008	298.2	268.1	89.9	261.1	216.8	83.0
2009	399.7	341.3	85.4	311.8	250.7	80.4
2010	572.4	509.7	89.0	427.2	347.8	81.4
2011	1,449.4	1,299.2	89.6	907.8	776.5	85.5
2012	461.8	369.0	79.9	356.3	270.2	75.8
2013	394.8	272.1	68.9	347.3	243.8	70.2
2014	374.5	220.6	58.9	302.0	205.5	68.1
2015	261.7	152.2	58.2	230.5	135.2	58.6
2016	201.1	97.3	48.4	191.5	96.9	50.6
2017	438.1	326.4	74.5	320.6	246.7	76.9
Sum	5,561.7	4,529.2		4,189.0	3,261.7	

a TE is trap efficiency

Fig. 4.21.은 유사 저감 대책을 적용하기 전과 적용 후의 2007~2017년 간 누적 퇴적량을 나타내고 있다. 유사 저감 대책을 적용하기 전의 10년간

의 누적 퇴적량은 약 4,529.2 ton이며, 유사 저감 대책을 적용한 후의 누적 퇴적량은 3,262 ton으로 나타났다. 유사 저감 대책을 적용할 경우 10년간 약 1,268 ton의 퇴적량 저감되는 것으로 나타났다.

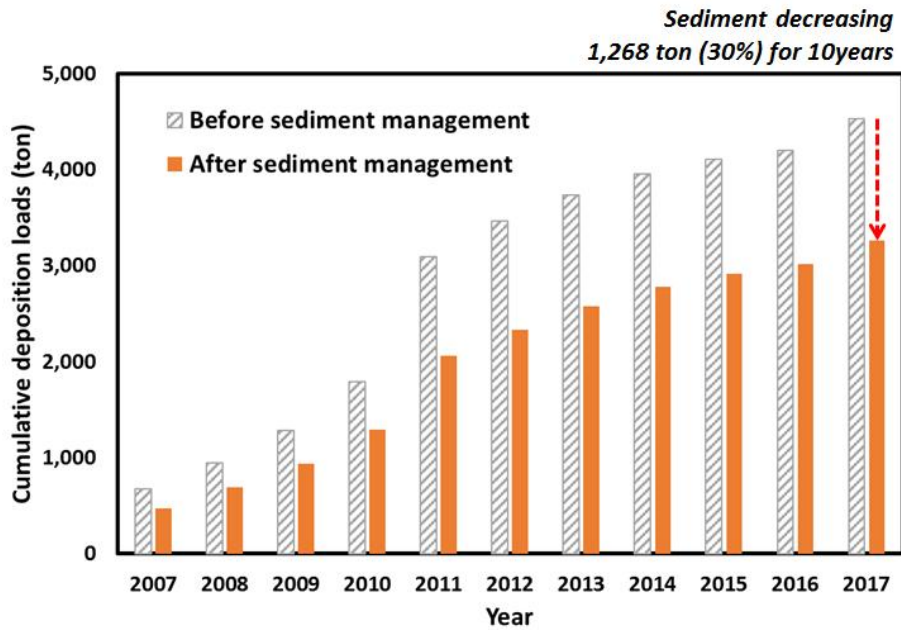


Fig. 4.21. Cumulative sediment deposition loads under sediment management

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 수문 모형과 수리 모형을 연계하여 입장저수지 유역의 유사 해석 및 유사 관리 방안을 적용하기 위해, 수문 모형을 이용하여 상류 유역에서 발생하는 토양 유실량을 추정하고, 수리 모형을 이용하여 저수지 내 유사의 퇴적 분포 및 퇴적량을 추정하고, 유사 저감 대책을 적용하여 상류 유역의 유사 저감이 저수지 내 퇴적량 감소에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 입장 저수지 상류 유역인 양대천과 무명천에 대해 토양 유실량을 추정하기 위한 수문 모형으로 SWAT 모형을 사용하였다. 모의 결과의 보정을 위해 실측 자료를 기반으로 수위-유량 관계식 및 유사량-유량 관계식을 개발하였다. 유출량 보정 결과 R^2 은 0.71~0.90, $RMSE$ 는 4.74~5.93 mm 그리고 NSE 는 -0.05~0.84로 나타났으며, 유사량 보정 결과 R^2 은 0.99, NSE 는 0.87~0.95 그리고 $PBIAS$ 는 -20.47~27.19%로 나타났다.

2. 입장 저수지 내 유사의 퇴적 분포 및 퇴적량을 추정하기 위한 수리 모형으로 EFDC 모형을 사용하였다. 모형의 구축을 위해 저수지 측량 자료를 바탕으로 계산 격자망을 구성하였고, 유입부 경계조건으로 SWAT 모형으로 모의된 양대천과 무명천 지점의 유량 및 유사량을 설정하였으며, 유출부 경계조건으로 MASA 모형으로 모의된 농업용수 공급량 및 수문/물넘이 방류량을 설정하였다. 격자의 내용적 곡선, 수위 모의 재현성 등을 고려한 결과 저수지의 실제 지형 및 수위 재현성이 소폭 차이가 있으나 전체적인 경향은 잘 모의되는 것으로 나타났다.

3. 유역의 유사 관리를 위해 발생원 관리와 배출원 관리 대책을 적용하였다. 발생원 관리를 위해 밭으로 분류된 지역은 등고선 재배와 부초 멀칭을 적용하였으며, 나지로 분류된 지역은 식생을 조성하였으며, 배출원 관리를 위해 양대천 유역 말단에 가상의 저류지를 설치하였다. 발생원 유사 저감 대책을 시행할 경우 10년간 약 9.22 ton, 연평균 0.92 ton의 유사량이 저감되며, 연평균 약 0.17%의 감소 효과를 보였다. 배출원 유사 저감 대책을 시행할 경우 10년간 약 1,317.78 ton, 연평균 약 124.71 ton의 유사량이 저감되며, 연평균 약 24.7%의 유사량이 감소되는 것으로 나타났다.

4. 상류 유역의 유사 저감이 저수지 내 퇴적량 감소에 미치는 영향을 분석하기 위해 EFDC 모형을 이용하여 유사 저감 대책의 적용 전과 후를 비교하였다. 저수지 내 유사의 퇴적 분포는 주로 초기에는 유입부 부근에 퇴적되고, 시간이 지날수록 제방 쪽으로 쌓여가는 양상을 보였다. 주요 퇴적 범위는 유입부의 약 $8,400\ m^2$ 의 범위로 나타났다. 이에 따라 저수지 내 유사 관리를 위해 준설 등을 적용할 경우 유사 유입부 부근의 퇴적토를 우선적으로 부분 준설하는 방안을 고려할 수 있다. 저수지 내 퇴적량은 발생원 및 배출원 저감 대책을 시행할 경우 10년간 약 1,267.54 ton, 연평균 약 115.2 ton의 퇴적량이 저감되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 유역 수문 모형 및 수리 모형을 연계하여 유역의 토양 유실량 및 저수지 내 퇴적량을 예측하고, 유역의 종합적인 유사 관리를 위한 유사 저감 방안을 모색하였다. 향후 장기간의 수질 모니터링 및 퇴적토 조사 등이 병행된다면, 저수지 내 준설량, 준설 위치 및 적정 준설 주기 등을 예측할 수 있는 도구로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구의 결과는 유역의 유사 저감 대책 수립 시 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 강동균, 2005. 소양강댐 상류 내린천 유역에서 SWAT을 이용한 BMP의 유사 발생 저감 효과의 분석. 강원대학교 석사학위논문.
2. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량 모의시스템 개발. 서울대학교 박사학위논문.
3. 강문성, 박승우, 임상준, 김학관, 2003. RUSLE을 위한 반월 주기 강우가식성 인자 산정. 한국농공학회지, 45(3), 29-40.
4. 건설교통부, 1992. 댐 설계를 위한 유역단위 비유수량 조사 연구.
5. 국립환경과학원, 2010. 수질오염 총량관리를위한 개발사업 비점 오염원 최적관리지침.
6. 김대곤, 2010. SWAT과 HEC-RAS 모형을 결합한 내성천 유역의 토사수지분석. 동의대학교 박사학위논문.
7. 김동일, 2012. 유역 탁수유입 저감대책이 저수지 및 하류하천에 미치는 영향 분석. 경북대학교 박사학위논문.
8. 김민호, 윤성완, 정세웅, 2012. 저류지의 탁수저감효율평가를 위한 SWAT모형과 Brune식의 비교. 한국물환경학회·대한상하수도학회 2012 공동학술발표회 논문집, 786-787.
9. 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, 2002. 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. 대한환경공학회지, 24(11), 2019-2027.
10. 김성재, 박태양, 장민원, 김상민, 2010. 산림지역의 유출특성을 고려한 남강댐유역내 주요 하천관측지점에 대한 홍수유출량 추정. 한국농공학회논문집, 52(6), 85-94.
11. 김정곤, 손경호, 노준우, 이상욱, 2008. SWAT 모델을 이용한 임하·안동 유역의 부유사량 발생량 추정. 대한환경공학회지, 30(12), 1209-1217.
12. 김진혁, 박건형, 김기철, 서경석, 2011. 대산항 해역의 부유사 확산 수치모사. 대한환경공학회지, 33(1), 16-24.

13. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생 3 - 저수지 모의조작 모형의 응용. 한국농공학회지, 30(2), 95-104.
14. 남원호, 2013. 확률론 기반 농업용 저수지의 용수공급 지속가능성 및 운용성 평가. 서울대학교 박사학위논문.
15. 노준우, 이경수, 허영택, 김영성, 2014. 저수지 내 장기퇴사 및 배사효과 모의. 한국방재학회지, 14(4), 333-341.
16. 노희진, 김정민, 김영도, 강부식, 2013. 유역유출 변화에 따른 도암댐 저수지 수질 영향 예측. 대한토목학회지, 33(3), 975-985.
17. 류재일, 2010. 3차원 EFDC 모델을 이용한 주운 하천 유입 점착성 및 비점착성 유사의 이송과 퇴적 해석. 충북대학교 박사학위논문.
18. 박원철, 2016. 아라천 주운수로의 하상변동모의 및 퇴사관리방안. 공주대학교 박사학위논문.
19. 박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일, 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가지, 19(5), 465-473.
20. 박종윤, 정충길, 정인균, 이지완, 신형진, 김성준, 2010. SWAT 모형을 이용한 최적관리기법 적용에 따른 비점오염 저감방안 연구. 생명환경연구지, 32(2), 59-64.
21. 방기영, 2013. 영산강 하구의 계절별 퇴적작용과 퇴적물 수지 수치모형실험. 인하대학교 박사학위논문.
22. 손중석, 2010. 비점오염저감시설의 효율성 평가를 위한 유역모형의 적용. 청주대학교 석사학위논문.
23. 송정현, 2017. 다중목적 최적화 기법을 연계한 농업유역 수문 해석 시스템의 개발. 서울대학교 박사학위논문.
24. 신현석, 강두기, 2006. SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구. 한국수자원학회지, 39(3), 227-240.
25. 안재현, 장수형, 최원석, 윤용남, 2006. 저수지 장기운영을 위한 퇴적토사의 효율적관리(1) - 저수지 퇴사량 산정. 한국물환경학회지, 22(6), 1088-1093.
26. 예령, 윤성완, 정세웅, 2008. 대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT

- 모델의 적용. 한국수자원학회지, 41(2), 149-162.
27. 우창호, 황국웅, 1999. 토사유출 방지용 침사지 적정규모 설정방안에 관한 연구 - 목포시 부주산을 사례로. 한국조경학회지, 26(4), 59-69.
 28. 우효섭, 오종민, 2005. 수변완충지대를 이용한 비점오염물질 유입저감과 수변서식처 조성. 물과 미래, 38(3), 29-36.
 29. 원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최중대, 2009. 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. 한국물환경학회지, 25(4), 615-623.
 30. 윤용남, 1988. 저수지 퇴사. 한국수자원학회지, 21(1), 9-15.
 31. 이근상, 김정열, 안소라, 심정민, 2010. 기후변화에 따른 안동·임하호 유역의 부유사량 분석. 한국지리정보학회지, 13(1), 1-15.
 32. 이동주, 박영기, 2013. EFDC를 이용한 군산항의 유사 퇴적고 계산에 관한 연구. 한국수자원학회지, 46(5), 531-545.
 33. 이정현, 2011. 유량과 유사농도 이격현상을 고려한 용담호 3차원 탁수 모델링. 충북대학교 석사학위논문.
 34. 이지민, 류지철, 강현우, 강형식, 금동혁, 장춘화, 최중대, 임경재, 2012. SWAT모형을 이용한 유량 및 유사 예측 정확성 평가 및 최적관리 기법 효과 분석. 한국농공학회지, 54(1), 99-108.
 35. 이현동, 안재환, 배철호, 김운지, 2001. 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. 한국물환경학회지, 17(3), 313-326.
 36. 임상준, Brannan, K. M., Mostaghimi, S., 조재필, 2003. HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유사량 추정. 농촌계획, 9(4), 59-64.
 37. 장선숙, 김성준, 2017. SWAT모형을 이용한 RCP 기후변화 시나리오에 따른 고랭지농업유역의 수문 및 수질 평가. 한국수자원학회지, 59(3), 41-50.
 38. 장인수, 박기범, 이명진, 이준호, 2010. 소규모 개발유역의 저류지 결정에 관한 연구. 한국도시환경학회지, 10(3), 253-258.
 39. 전북발전연구원, 2007. GIS를 활용한 오염총량 대비 전라북도 비점오염원 관리방안 - 정읍시를 중심으로.

40. 전용봉, 2014. 부유토사 유출 억제를 위한 침사지 설계에 관한 연구 - 단지 개발 토공사 사례를 중심으로. 광운대학교 박사학위논문.
41. 정세웅, 이흥수, 류재일, 류인구, 오동근, 2008. ELCOM-CAEDYM을 이용한 대청댐 유입탁수의 3차원 모델링. 한국수자원학회지, 41(12), 1187-1198.
42. 정충길, 안소라, 김성준, 양희정, 이형진, 박근애, 2012. 벚지 피복에 의한 밭 비점오염원 유출저감효과 분석을 위한 HSPF와 SWAT 모델링. 한국농공학회지, 55(2), 47-57.
43. 정한석, 2014. 사회-수문시스템 모델링을 이용한 하수재이용 구역의 수문 특성 분석. 서울대학교 박사학위논문.
44. 최용훈, 2013. 소양호 구역의 농경지 관리방법이 탁수저감에 미치는 영향. 강원대학교 박사학위논문.
45. 최익성, 2012. EFDC와 WASP 7.4를 이용한 남강호 3차원 수리·수질모의 기법 연구. 충남대학교 석사학위논문.
46. 최중대, 2001. 침사지의 규모 산정방법. 한국관개배수, 8(2), 73-80.
47. 최진규, 구자웅, 손재권, 1998. 토양유실량예측공식 USLE 적용과 단위변환. 한국토양비료학회지, 31(3), 301-308.
48. 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2016. 농업생산기반정비 통계연보(2015년 판).
49. 한국환경정책·평가연구원, 2009. 다목적댐 상류 폐광산 등 비점오염원 관리방안 연구.
50. 허성구, 전만식, 박상현, 김기성, 강성근, 옥용식, 임경재, 2008. 고랭지농업의 작물별 객토량 변화에 따른 토양유실 저감 분석. 한국물환경학회지, 24(2), 185-194.
51. 환경부, 2014. 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼.
52. Ackers, P., White, W. R., 1973. Sediment transport: new approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, 99(11), 2041-2060.
53. Ariathurai, R. and Krone, R. B., 1976. Finite element model for cohesive sediment transport. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 323-338.

54. Arnold, J. G., Allen, P. M., Morgan, D. S., 2001. Hydrologic model for design and constructed wetlands. *Wetlands*, 21(2), 167-178.
55. Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L., 2013. SWAT 2012 Input/Output documentation. Texas Water Resources Institute.
56. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., 1998. Large area hydrologic modeling assessment part 1: model development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
57. Blumberg, A. F., Mellor, G. L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models, N. Heaps edited, *Coastal and Estuarine Sciences*, American Geophysics Union, 4, 1-16.
58. Bracmort, K. S., Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., Arnold, J. G., 2006. Modelling long-term water quality impact of structural BMPs. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 367-374.
59. Brownlie, W. R., 1981. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Doctoral dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, Canada.
60. Brune, G. M., 1986. Trap efficiency of reservoirs. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 34(3), 407-418.
61. Di Toro, D. M., Fitzpatrick, J. J., Thomann, R. V., 1983. Documentation for water quality analysis simulation program (WASP) and model verification program (MVP). Hydrosience, Inc., Westwood, NY, for U.S. EPA, Duluth, MN Contract No. 68-01-3872.
62. Donigan, A. S., Imhoff, J. C., Bicknell, B. R., 1983. Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint source pollution via simulation – HSPF. *Agricultural Management and Water Quality*, Schaller, F. W. and Bailey, G. W. edited, Iowa State University Press, Iowa, U.S.

63. Engelund, F., Hansen, E. E., 1967. A monograph of sediment transport in alluvial rivers. Copenhagen: Technical University of Denmark.
64. Fentie, B., Rose, C. W., Coughlan, K. J., 1999. GUEST 3.0: A program for calculating a soil erodibility parameter in a physically-based erosion model. Working paper 1/99. Faculty of Environmental Sciences, Griffith University, Brisbane, Australia.
65. Flanagan, D. C, Nearing, M. A., 1995. USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation, NSERL, Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1194.
66. Gholami, L., Sadeghi, S. H., Homaei, M., 2012. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots. Soil Science Society of America Journal, 77(1), 268-278.
67. Goldman, S. J., Jackson, K., Bursztynsky, T. A., 1986. Erosion and sediment control handbook. New York: McGraw-Hill Inc.
68. Griacia, M. and Parker, G., 1991. Entrainment of bed sediment into suspension. Journal of Hydraulic Engineering, 117(4), 414-435.
69. Hamrick, J. H., 1992. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. Applied Marine Science and Ocean Engineering, Special report No. 317, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
70. Hamrick, J. M. 1992. A three dimensional environmental fluid dynamics computer code; Theoretical and computational aspects. Special Report. The college of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
71. Her, Y. G., Kang, M. S., Park, S. W., 2006. Estimating USLE soil erosion through GIS-based decision support system. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 48(7), 3-14.

72. Her, Y., Frankenberger, J., Chaubey, I., Srinivasan, R., 2015. Threshold effects in HRU definition of the soil and water assessment tool. *Transaction of ASABE*, 58(2), 367-378.
73. Im, S. J., Brannan, K. M., Mostaghimi S., Kim, S. M., 2007. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(11), 1561-1570.
74. Kashyap, S., Dibike, Y., Shakibaeinia, A., Prowse, T., 2017. Two-dimensional numerical modelling of sediment and chemical constituent transport within the lower reaches of the Athabasca River. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2286-2303.
75. Knisel, W. G., 1980. CREAMS, A field model for chemical, runoff and erosion from agridultural management systems, USDA Conservation Research Report No. 26.
76. Leon, L. F., Smith, R. E. H., Romero, J. R., Hecky, R. E., 2006. Lake Erie hypoxia simulations with ELCOM-CAEDYM. *Proceedings of the 3rd Biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, Burlington, Vermont, July 9-13.
77. Liu, W. C., Chan, W. T., Tsai, D. W., 2016. Three-dimensional modelling of suspended sediment transport in a subalpine lake. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 173.
78. Liu, X., Huang, W., 2009. Modeling sediment resuspension and transport induced by storm wind in Apalachicola Bay, USA. *Environmental Modelling and Software*, 24(11), 1302-1313.
79. Mellor, G. L., 1998. Users guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model. *Program in Atmospheric and Oceanic Sciences*, Princeton University.
80. Molinas, A., Yang, J. C., 1986. Computer program user's manual for GSTARS. U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Engineering

Research Center, Washington, D. C.

81. Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M. E., 1998. The European Soil Erosion Model(EUROSEM): a dynamic approach for prediction sediment transport from and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 527-544.
82. Moriasi, D. M., Gitau, M. W., Pai, N., Daggupati, P., 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
83. Nasr, A., Bruen, M., Jordan, P., Moles, R., Kiely, G., Byrne, P., Regan, B. O., 2004. Physically-based distributed, catchment modelling for estimating sediment and phosphorus loads to rivers and lakes: Issues of model complexity, spatial and temporal scales and data requirements. *National Hydrology Seminar 2004: The Water Framework Directive-Monitoring & Modeling Issues for River Basin Management*, November 2004, Tullamore, co. Offaly. Office of Public Works, 2004.
84. Papanicolaou, A. N., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S., Edinger, J., 2008. Sediment transport modeling review – current and future developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 1-14.
85. Phomcha, P., Wirojanagud, P., Vangpaisal, T., Thaveevouthti, T., 2012. Modeling the impacts of alternative soil conservation practices for an agricultural watershed with the SWAT model. *Procedia Engineering*, 32, 1205-1213.
86. Singh, J., Knapp, H., Arnold, J. G., Demissie, M., 2005. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343-360.
87. Sloan, P. G., Moore, I. D., 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822.

88. Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 9(3)1, 99-164.
89. Smith, J. D. and McLean, S. R., 1977. Spatially averaged flow over a wavy surface. *Journal of Geophysical research*, 82(12), 1735-1746.
90. Smolarkiewicz, P. K., Clark, T. L., 1986. The multidimensional positive definite advection transport algorithm: Further development and applications. *Journal of Computational Physics*, 67(2), 396-438.
91. Tetra Tech, 1999. Three-dimensional hydrodynamic and water quality model of Peconic estuary, for Peconic estuary program.
92. Thomas, W. A., Prashum, A. I., 1977. Mathematical model of scour and deposition. *Journal of Hydraulics Division*, 110(11), 1613-1641.
93. Van Doren, D. M., Moldenhauer, W. C., Triplett, G. B., 1984. Influence of long-term tillage and crop rotation on water erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 48(3), 636-640.
94. van Rijn, L. C., 1984. Sediment transport, part 2: suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1613-1641.
95. Volk, M., 2016. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, 175, 1-3.
96. Volk, M., 2017. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale-Part 2. *Agricultural Water Management*, 180, 191-193.
97. Waidler, D., White, M., Steglich, E., Wang, S., Williams, J., Jones, C. A., Srinivasan, R., 2009. Conservation practice modeling guide for SWAT and APEX. Texas Water Resources Institute.
98. Walstra, D. J., van Rijn, L. C., Aarninkhof, S. G., 1998. Sand transport at the lower shoreface of the Dutch coast. Technical Report Z2378, Delft Institute of Hydraulics, The Netherlands.
99. Waterways Experiment Station, 1998. A user's manual for SED2D-WES

version 4.3. USACE.

100. Williams, J. R., 1995. Chapter 25. The EPIC Model, 909-1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.
101. Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1978. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D. C.
102. Wool, T. A., Davie, S. R., Rodriguez, H. N., 2003. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse river estuary, North Carolina. *Journal of water resources planning and management*, 129(4), 295-306.
103. Xu, T., You, X., 2017. Numerical simulation of suspended sediment concentration by 3D coupled wave-current model in the Oujiang river estuary, China. *Continental Shelf Research*, 137, 13-24.
104. Yang, C. T., 1979. Unit stream power equations for total load. *Journal of Hydrology*, 40(1), 123-138.
105. Zhao, L., Li, Y., Zou, R., He, B., Zhu, X., Liu, Y., Wang, J., 2013. A three-dimensional water quality modeling approach for exploring the eutrophication responses to load reduction scenarios in lake Yilong (China). *Environmental Pollution*, 177, 13-21.
106. Zhen, G. J. 2007. *Hydrodynamics and water quality, modeling rivers, lakes and estuaries*. Wiley-interscience.

Abstract

Analysis of sedimentation processes in Ipjang reservoir using SWAT and EFDC

Shin, Sat-Byeol

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering

The Graduate School of Seoul National University

The objective of this study was to estimate soil loss in the upper streams, predict sediment deposition in Ipjang reservoir and suggest sediment management scenarios for sediment reduction using watershed hydrological model and numerical hydraulic model.

For this purpose, SWAT model was used to estimate soil loss for in the two upper streams and EFDC model was used to predict the spatial distribution and the amount of sediment deposition in the Ipjang reservoir. Sediment reduction scenarios applied in this study, (i) managing the source of generation and (ii) managing the source of discharge. For managing the source of generation, contour tillage and mulching was applied to upland and vegetation covering was applied to barren region. The simulation result showed that the amount of sediment reduction was mitigate, because the area of upland and barren region was a very small ratio of about 3% of the total watershed. For managing the source of discharge, detention pond was applied to downstream of the watershed. The simulation result showed the scenario reduced the current sediment yield about 124.71 ton/year. As a result of sediment deposition using EFDC model, the distribution was

initially deposited near the inflow part and gradually accumulated toward the bank. The simulation result showed the reduction scenario reduced the current sediment deposition about 115.2 ton/year.

This study findings are expected to be used as a basis to establish management solutions for sediment reduction.

Keywords : SWAT; EFDC; Soil loss; Reservoir deposition; Sediment
management modeling

Student Number : 2016-21705